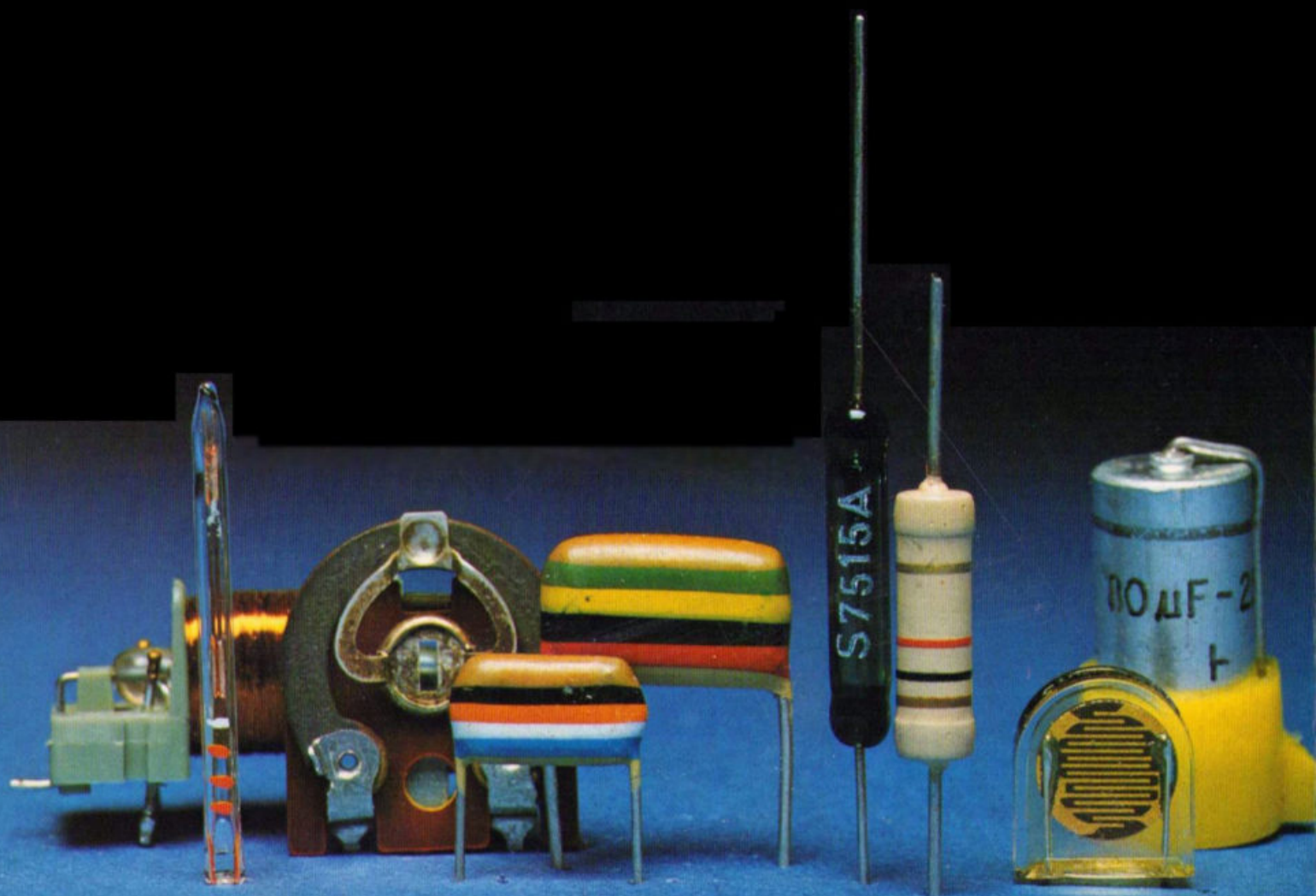


PASSIEVE COMPONENTEN

D.J.W. SJOBBEMA



PHILIPS TECHNISCHE BIBLIOTHEEK — KLUWER

passieve componenten

PASSIEVE COMPONENTEN

D.J.W. SJOBBEMA



PHILIPS TECHNISCHE BIBLIOTHEEK
KLUWER TECHNISCHE BOEKEN B.V.-DEVENTER

Redactie: P. P. Mastboom

ISBN 90 201 1089 6

D/1988/0108/180

NUGI 832

© Kluwer Technische Boeken B.V. — Deventer

1^e druk 1979

2^e oplage 1988

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a database or retrieval system, or published, in any form or in any way, electronically, mechanically, by print, photoprint, microfilm or any other means without prior written permission from the publisher.

Ondanks alle aan de samenstelling van de tekst bestede zorg, kan noch de redactie noch de uitgever aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele schade, die zou kunnen voortvloeien uit enige fout, die in deze uitgave zou kunnen voorkomen.

Voorbericht

De laatste twintig jaren heeft de elektronica een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Dit was in belangrijke mate te danken aan de toenemende kennis van de halfgeleidertechnologie, waardoor het o.a. mogelijk werd om zeer grote aantallen componenten zoals weerstanden, dioden en transistors onlosmakelijk in een uiterst klein stukje siliciumkristal onder te brengen (Large Scale Integration). Dit resulteerde in vrij gecompliceerde componenten waarvan de microprocessor (het signaalverwerkende element van een microcomputer) een typisch voorbeeld is. Het is zodoende mogelijk geworden om bepaalde mechanisch geregelde processen (met schakelwals en relais) op eenvoudige wijze volledig elektronisch te doen verlopen, waarbij zowel ruimte als kosten worden bespaard. Het programma van een wasmachine is een typisch voorbeeld van een mechanisch geregeld proces dat in de komende jaren elektronisch zal worden geregeld.

Ook in andere takken van de elektronica zijn grote veranderingen op komst, denk bijvoorbeeld aan de optische communicatie door middel van glasvezels.

Uit het bovenstaande volgt dat naast de theoretische kennis van de elektronica ook een behoefte ontstaat aan kennis van de componenten waaruit de schakeling wordt opgebouwd om zodoende tot een goedkoop, compact en betrouwbaar ontwerp te komen. De sterke uitbreiding van het onderdelenpakket dat thans op de markt wordt gebracht, maakte het noodzakelijk om bij deze nieuwe bewerking van het boek „COMPONENTEN” de te behandelen stof in twee delen onder te brengen. De opzet van deze boeken, waarvan het ene is gewijd aan de passieve onderdelen en het andere aan de actieve onderdelen, is evenals de oorspronkelijke opzet van het boek „COMPONENTEN” gericht op een systematische en functionele behandeling van de belangrijkste elektronische componenten die in de handel worden gebracht. De stof is daarbij beperkt tot de onderdelen voor algemeen gebruik. Bij deze nieuwe opzet is een dankbaar gebruik gemaakt van de opbouwende kritiek die de auteur van een aantal leraren bij het technisch onderwijs mocht ontvangen.

D. J. W. Sjobbema

Inhoud

Inleiding	9
1. Enkele algemene begrippen	11
1.1. Nominale waarde, tolerantie en werkelijke waarde	11
1.2. De grootheid decibel (dB)	12
1.3. Schemasymbolen.	13
1.4. Veiligheidseisen.	15
2. Draad en kabel	16
2.1. Materiaal en eisenpakket	16
2.2. Groepsindeling	18
2.3. Montage- en wikkeldraad	20
2.4. Verbindingskabels en netsnoeren	22
2.5. Leidingen voor HF-signalen, golfweerstand	24
2.6. Demping	26
2.7. Coaxiale kabel	27
2.8. Bamboekabel	29
2.9. Bandleiding	30
2.10. Buiskabel.	31
2.11. De draden in groep vier.	31
2.12. Metingen aan HF-kabels	32
2.13. Glasvezelkabel	33
3. Lineaire weerstanden	36
3.1. Wat zijn lineaire weerstanden?	36
3.2. Groepsindeling	37
3.3. Weerstandswaarde en tolerantie	37
3.4. Het maximaal toelaatbare vermogen	39
3.5. Het aangeven van de weerstandswaarde	41
3.6. Draadgewonden weerstanden.	43
3.7. Bifilair gewikkelde weerstanden	46
3.8. Kaartweerstand	47
3.9. Schijfweerstand	47
3.10. Instelbare draadweerstand	48
3.11. Koolweerstand.	50
3.12. De kritische weerstandswaarde.	52
3.13. Het ruisen van koolweerstand	53
3.14. Stabiliteit.	56

3.15.	Metaalfilmweerstanden	59
3.16.	Kleurcodering	59
3.17.	Potentiometers (regelbare weerstanden)	60
4.	Niet-lineaire weerstanden	70
4.1.	Indeling	70
4.2.	Spanningsafhankelijke weerstanden (VDR's)	70
4.3.	Licht-afhankelijke weerstanden (LDR's)	85
4.4.	NTC-weerstanden	88
4.5.	PTC-weerstanden	95
4.6.	Mechanisch gevoelige weerstanden	104
4.7.	Magnetisch gevoelige weerstanden	107
5.	Condensatoren	110
5.1.	Capaciteit	110
5.2.	Relatie tussen capaciteit en weerstand van diëlektricum	111
5.3.	De lekstroom	112
5.4.	Soorten condensatoren	112
5.5.	Elektrolytische condensatoren	114
5.6.	Keramische condensatoren	124
5.7.	Foliecondensatoren	129
5.8.	Micacondensatoren	134
5.9.	Papiercondensatoren	135
5.10.	Instelbare condensatoren	138
5.11.	Variabele condensatoren	139
6.	Spoelen en transformatoren	143
6.1.	Overzicht en indeling	143
6.2.	Enkele spoelen met luchtkern	145
6.3.	HF- en MF-spoelen met ferrietkern	147
6.4.	Transformatoren	148
6.5.	Enkele speciale transformatoren	151
7.	Schakelaars	153
7.1.	Groepsindeling	153
7.2.	Enkele elektrische grootheden	155
7.3.	Beveiliging van schakelaars	155
7.4.	Reedschakelaars	156

8.	Connectors.	159
8.1.	Overzicht en eisen	159
9.	Gedrukte bedrading	162
9.1.	Gedrukte bedradingspanelen	162
9.2.	Hoe komt een dergelijke bedrading tot stand?	163
10.	Veiligheden	167
10.1.	Inleiding	167
10.2.	Stroombeveiliging	167
10.3.	Smeltveiligheden	168
10.4.	Thermische schakelaars.	174
10.5.	Maximaalschakelaars	175
10.6.	Spanningsbeveiliging	175

Inleiding

Elk elektronisch apparaat is samengesteld uit een aantal onderdelen, die direct kunnen worden verdeeld in mechanische onderdelen en elektronische onderdelen. Voorbeelden van mechanische onderdelen zijn: beugels, assen, bedieningsknoppen en bevestigingsmateriaal zoals schroeven en moeren. Met andere woorden onderdelen die geen invloed uitoefenen op de elektrische werking van het desbetreffende apparaat.

De elektronische onderdelen zijn aan de hand van hun eigenschappen weer te verdelen in onderdelen met een passief karakter en onderdelen met een actief karakter. Vaak ook kortweg aangeduid als passieve en actieve onderdelen. De begrippen passief en actief hebben betrekking op de mogelijkheid om een elektrisch signaal resp. niet dan wel te kunnen versterken. Weerstanden, condensatoren en spoelen zijn voorbeelden van passieve onderdelen, terwijl transistors en elektronenbuizen typische actieve onderdelen zijn.

Er wordt hier gewezen op het feit dat er ook enkele onderdelen zijn die een overwegend passief karakter hebben en toch meestal worden ingedeeld bij de groep actieve onderdelen. Speciaal wordt hier gedacht aan de diverse soorten dioden.

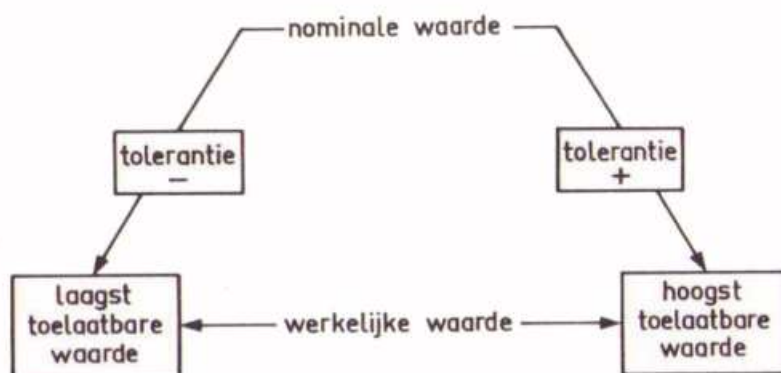
Achtereenvolgens worden in dit boek de belangrijkste passieve onderdelen beschreven, waarbij aandacht wordt geschonken aan het onderdeel (constructie en eigenschappen) en in bepaalde gevallen ook aan de toepassing en controle.

Gezien de grote verscheidenheid van onderdelen die door de verschillende fabrikanten op de markt worden gebracht, is een zekere beperking toegepast, die niet alleen geldt voor het produkt, doch ook voor de benaming ervan.

1. Enkele algemene begrippen

1.1. Nominale waarde, tolerantie en werkelijke waarde

De meeste onderdelen worden in grote aantallen gefabriceerd. Dit betekent dat een bepaalde afwijking t.o.v. de aangegeven waarde moet worden geaccepteerd, aangezien de betreffende onderdelen anders veel te duur zouden worden. Onder de nominale waarde wordt nu de waarde verstaan, die op het onderdeel staat aangegeven. De werkelijke waarde zal in het algemeen niet gelijk zijn aan de nominale waarde, doch iets hoger of iets lager. De fabrikant vermeldt naast de nominale waarde dan ook de grootst toelaatbare afwijking (tolerantie) in procenten van de nominale waarde. Op deze wijze worden twee grenswaarden verkregen, waartussen de werkelijke waarde mag variëren. In onderstaand schema is dit anschouwelijk voorgesteld.



Voorbeeld:

Van een weerstand bedraagt de nominale weerstand $100\ \Omega$, de tolerantie is $\pm 5\%$. Het $\pm$ heeft hier niet de betekenis van „ongeveer”, maar geeft aan dat de werkelijke weerstandswaarde in positieve en negatieve zin mag afwijken van de nominale waarde. De werkelijke waarde mag dus groter dan wel kleiner zijn dan de nominale waarde. Hierbij worden echter wel twee grenzen gesteld. In dit voorbeeld zijn dit:

onderste grens $100\ \Omega - (5\% \text{ van } 100\ \Omega) = 95\ \Omega$;

bovenste grens $100\ \Omega + (5\% \text{ van } 100\ \Omega) = 105\ \Omega$.

Bij bepaalde onderdelen zijn de + en de - tolerantie niet aan elkaar gelijk, zoals in het bovenstaande voorbeeld. De tolerantie bedraagt dan bijv. $+20/-50\%$. Voor een condensator van $1000\ \text{pF}$ bedraagt in dat geval de onderste grens $500\ \text{pF}$ en de bovenste grens $1200\ \text{pF}$.

1.2. De grootheid decibel (dB)

In veel technische beschrijvingen en catalogi wordt de grootheid decibel (meestal afgekort tot dB) gehanteerd.

Genoemde grootheid heeft in eerste instantie betrekking op een bepaalde verhouding tussen twee vermogens. Om dit te illustreren is in fig. 1-1 een versterker afgebeeld. Aan deze versterker wordt een elektrisch vermogen van P_1 watt toegevoerd, terwijl het uitgangsvermogen P_2 watt bedraagt.

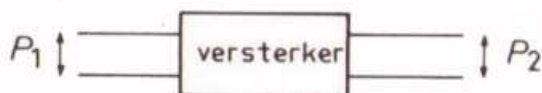


Fig. 1-1

De signaalversterking bedraagt nu, uitgedrukt in een lineaire verhouding: $\frac{P_2}{P_1}$ en uitgedrukt in decibel: $10 \log \frac{P_2}{P_1}$

Alvorens verder te gaan, volgt nu eerst enige uitleg van het Briggiaanse logaritmenstelsel.

Onder de Briggiaanse logaritme van een getal m wordt de exponent x verstaan waartoe 10 moet worden verheven om m te verkrijgen. In de vorm van een formule:

$$10^x = m \qquad \log m = x$$

Voorbeelden:

$10^x = 1$	$x = 0$	$\log 1 = 0$
$10^x = 10$	$x = 1$	$\log 10 = 1$
$10^x = 100$	$x = 2$	$\log 100 = 2$
$10^x = 1000$	$x = 3$	$\log 1000 = 3$
$10^x = 10\,000$	$x = 4$	$\log 10\,000 = 4$

echter ook:

$10^x = 3$	$x = 0,4771$	$\log 3 = 0,4771$
$10^x = 4$	$x = 0,6021$	$\log 4 = 0,6021$
$10^x = 16$	$x = 1,2041$	$\log 16 = 1,2041$
$10^x = 50$	$x = 1,699$	$\log 50 = 1,699$

Bedraagt het eerder vermelde ingangsvermogen (P_1) 10 mW en het uitgangsvermogen 100 W, dan is de versterking $100/0,01 = 10\,000$. Uitgedrukt in decibels geeft dit:

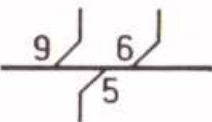
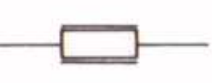
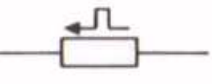
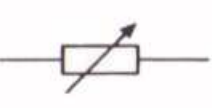
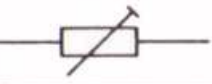
$$10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log 10^4 = 40 \text{ dB.}$$

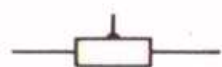
De decibel is het tiende gedeelte van de bel, die voor normaal gebruik echter te groot is. Een versterking van 40 dB komt zodoende overeen met een versterking van 4 B (bel).

1.3. Schemasymbolen

In de elektronica worden schakelingen in tekening gebracht door een principe-schema, waarin de verschillende onderdelen worden aangegeven door symbolen.

In het nu volgende zijn de passieve componenten, die in dit boek worden behandeld, vermeld met daarnaast het symbool zoals dat door de meeste fabrikanten wordt toegepast.

<i>Symbol</i>	<i>Omschrijving</i>
	Stroomgeleider
	Afgeschermdde stroomgeleider
	Coaxiale leiding
	Soepele leiding (snoer) met steker
	Draadboom met uitlopers
	Twee kruisende stroomgeleiders (geen elektrisch contact)
	Stroomgeleider met aftakking
	Weerstand (Vaak wordt de weerstandswaarde in het symbool aangegeven)
	Veiligheidsweerstand
	Springweerstand
	Variabele weerstand
	Instelbare weerstand



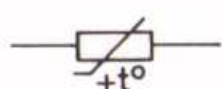
Weerstand met vaste aftakking



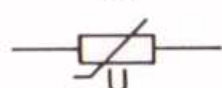
Regelbare weerstand met vaste aftakking



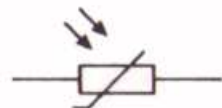
NTC (weerstand met negatieve temperatuurcoëfficiënt)



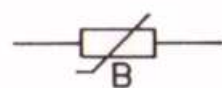
PTC (weerstand met positieve temperatuurcoëfficiënt)



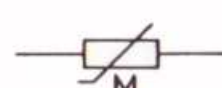
VDR (symmetrisch)
(Spanningsafhankelijke weerstand)



LDR
(Lichtafhankelijke weerstand)



Fluxistor (magnetisch gevoelige weerstand)
(B = magnetische inductie)



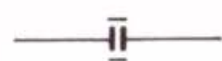
Mechanisch gevoelige weerstand (b.v. rekstrookje)



Condensator



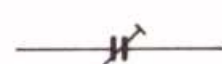
Doorvoercondensator



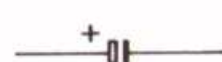
Veiligheidscondensator



Variabele condensator



Instelbare condensator (trimmer)



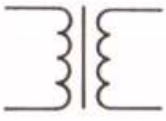
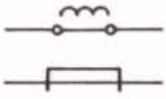
Elektrolytische condensator



Bipolaire elektrolytische condensator



Spoel

<i>Symbol</i>	<i>Omschrijving</i>
----	Ferromagnetische kern
—	IJzeren kern
	Transformator
	
	Ferrietkraal over een leiding
	Relaispoel
	Smeltveiligheid

1.4. Veiligheidseisen

Vanzelfsprekend worden aan de verschillende onderdelen bepaalde eisen gesteld voor wat betreft de veiligheid. Dit heeft zowel betrekking op de temperatuur als de mogelijkheid om onder spanning staande delen te kunnen aanraken. Zo mogen b.v. in veel landen alleen draden en kabels worden verwerkt, die door de landelijke keurbureaus zijn goedgekeurd. Enkele van deze keuren zijn: Semco (Zweden), Demco (Denemarken), C.S.A. (Canada) en UL (USA). De Nederlandse en Belgische keurbureaus zijn resp. Kema en Cebec.

2. Draad en kabel

2.1. Materiaal en eisenpakket

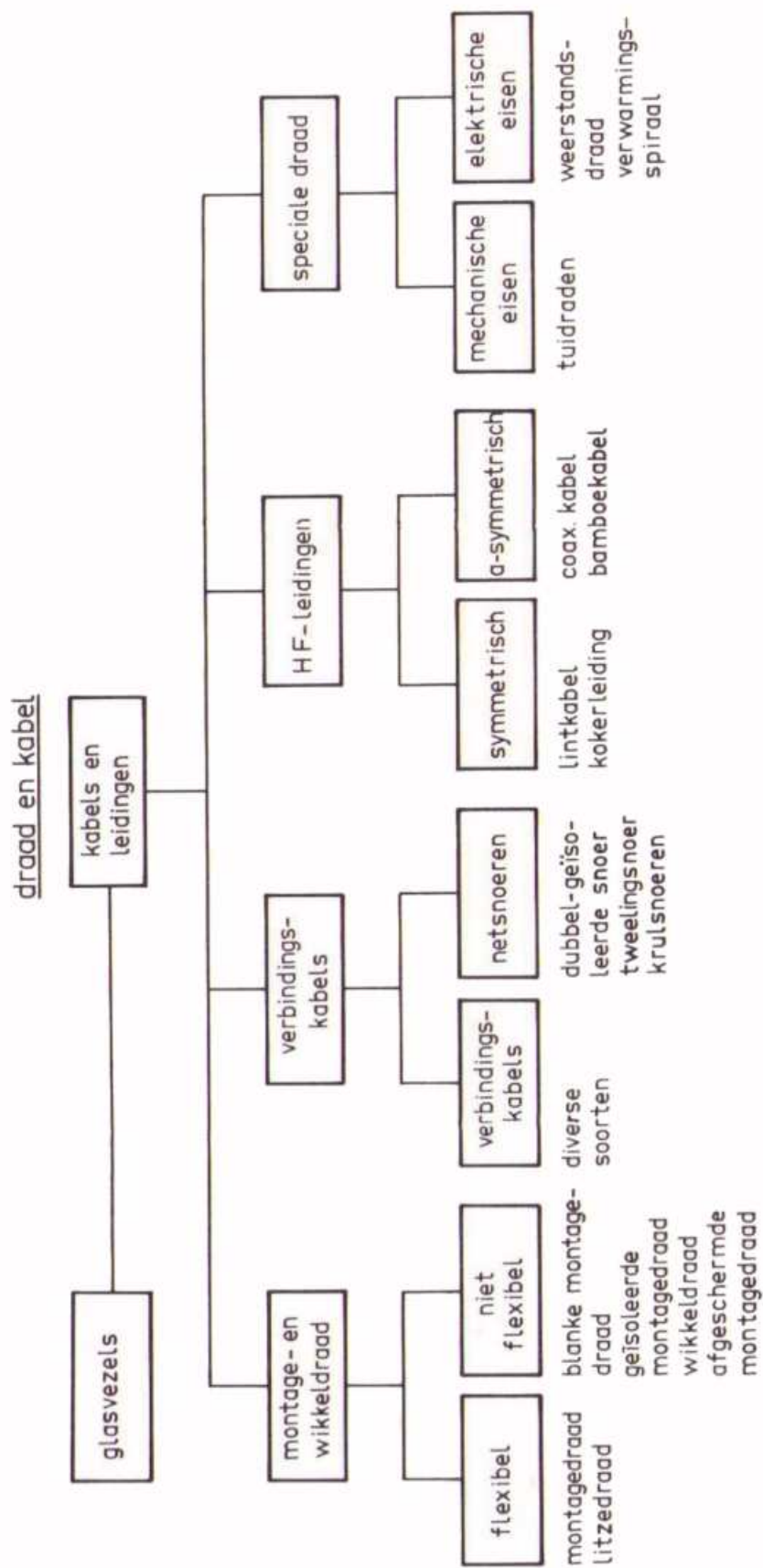
Draad en kabel spelen in de elektronica een belangrijke rol als verbindingsmedia. Dit geldt zowel voor de verbinding tussen elektronische apparaten onderling als tussen de onderdelen, die gezamenlijk een schakeling vormen. In al deze gevallen moet een signaal worden doorgegeven. Genoemd signaal kan een elektrisch dan wel een optisch karakter hebben. In het eerste geval is de eigenlijke signaalgeleider een metaal en in het tweede geval glas (dus een isolator). Alhoewel de optische signaalgeleiding momenteel in het middelpunt van de belangstelling staat, wordt in eerste instantie aandacht geschonken aan de overdracht van elektrische signalen.

Bij genoemde overdracht mag het signaal niet of slechts in geringe mate worden beïnvloed door de verbindingsmedia. Dit heeft in de eerste plaats betrekking op de verliezen, die vanzelfsprekend zo laag mogelijk moeten zijn. De eigenlijke signaalgeleiders moeten dan ook een uiterst kleine specifieke weerstand hebben. Zilver zou voor dit doel het aangewezen metaal zijn, ware het niet dat zilver veel te kostbaar is. Koper is echter een zeer goede „tweede”. De specifieke weerstand van koper is niet veel groter dan die van zilver, het materiaal is goed tot draad te verwerken, terwijl koperen draden gemakkelijk en solide door solderen of door twisten aan elkaar zijn te bevestigen.

Geen wonder dat koper van de aanvang af een zeer belangrijke rol heeft gespeeld in de elektrotechniek. Het nadeel van koper is echter de toch nog vrij hoge prijs en de prijsschommelingen waaraan dit metaal op de wereldmarkt onderhevig is. Vandaar dat aluminium in de kabelindustrie een steeds belangrijkere rol gaat spelen, iets dat mede te danken is aan de voortschrijdende kennis van de aluminiumtechnologie, waardoor soldeer- en andere verbindingsproblemen tegenwoordig goed kunnen worden opgelost.

Bij nadere beschouwing van een metalen stroomgeleider valt het op dat deze van de omgeving wordt gescheiden door een isolerend medium. Dit laatste kan de omringende lucht zijn, iets dat het geval is bij blanke montagedraad, dan wel bepaalde soorten isolatiemateriaal. Papier, kunststof, rubber en textiel worden daarbij het meeste toegepast.

Afhankelijk van de toepassing worden bepaalde eisen aan de te gebruiken draden of kabels gesteld. Eisen, die betrekking kunnen hebben op de elektrische, mechanische en in bepaalde gevallen ook de klimatologische eigenschappen van het desbetreffende materiaal. De elektrische eisen hebben naast de veiligheid, waarbij o.a. aandacht wordt geschonken aan de grootte van de isolatieweerstand, de maximaal



Overzicht 2-1

toelaatbare temperatuur en de stroomsterkte, vooral betrekking op bepaalde elektrische eigenschappen van het materiaal. Ten aanzien van telecommunicatiekabels zijn dit bijv. de capaciteit, de impedantie en de demping. Mechanische eisen hebben veelal betrekking op de treksterkte van de kabel, de mogelijkheid om goede verbindingen te kunnen maken met zachtsoldeer en de toelaatbare grootte van de kromtestraal bij het buigen.

Klimatologische eisen kunnen o.a. betrekking hebben op het bestand zijn tegen allerlei weersomstandigheden, een hoge graad van vochtigheid, zonlicht en bepaalde chemische dampen.

2.2. Groepsindeling

De draden en kabels die in elektronische apparatuur worden verwerkt, zijn functioneel in vier hoofdgroepen te verdelen. Zie overzicht 2—1. De eerste hoofdgroep omvat de verschillende soorten montagedraad en wikkeldraad. De tweede hoofdgroep de verbindingskabels en netsnoeren, terwijl de leidingen en kabels voor hoogfrequente signalen in de derde hoofdgroep worden ondergebracht. Tot slot zijn draden met zeer speciale eigenschappen, zoals tuidraden en verwarmingspiralen, in een vierde hoofdgroep verzameld.

Opmerking: De grote groep kabels voor energietransport, evenals de symmetrische kabels voor lokale en interlokale telefonie blijven hier buiten beschouwing.

Afgezien van bepaalde soorten weerstandsdraad hebben al deze draden en kabels gemeen, dat de eigenlijke stroomgeleider gewoonlijk uit koper bestaat. Om de specifieke weerstand zo klein mogelijk te houden, wordt voor dit doel zuiver koper (elektrolytisch koper) als uitgangsmateriaal gebruikt. (De zuiverheid van elektrolytisch koper bedraagt 99,95%). De gewenste draaddoorsnede wordt verkregen door walsen en trekken.

Het trekken is een koudbewerking, waarbij de draad achtereenvolgens door een serie trekstenen met een steeds kleinere opening wordt getrokken en zodoende een steeds kleinere diameter verkrijgt. Voor draden met een diameter kleiner dan 2,7 mm worden trekstenen met een kern van diamant gebruikt, terwijl voor de grotere draaddiameters hardmetalen trekstenen (meestal wolframcarbide) worden toegepast. In de trekbanken bevindt zich achter elke treksteen een trekkop, waaromheen de draad een aantal malen is geslagen. De wrijving tussen de draaiende trekkop en de draad is zo groot dat de draad wordt meegenomen en zodoende door de treksteen getrokken. Om direct contact tussen draad en treksteen te voorkomen, wordt de draad gesmeerd met trekvet. Bij meervoudige trekbanken loopt de draad door een trekvloeistof, die tevens dient voor de koeling van draad en treksteen.

In fig. 2—1 is schematisch het trekken van een draad op een drievoudige trekbank afgebeeld. De draad passeert hier drie trekstenen en wordt voortbewogen door drie trekkoppen.

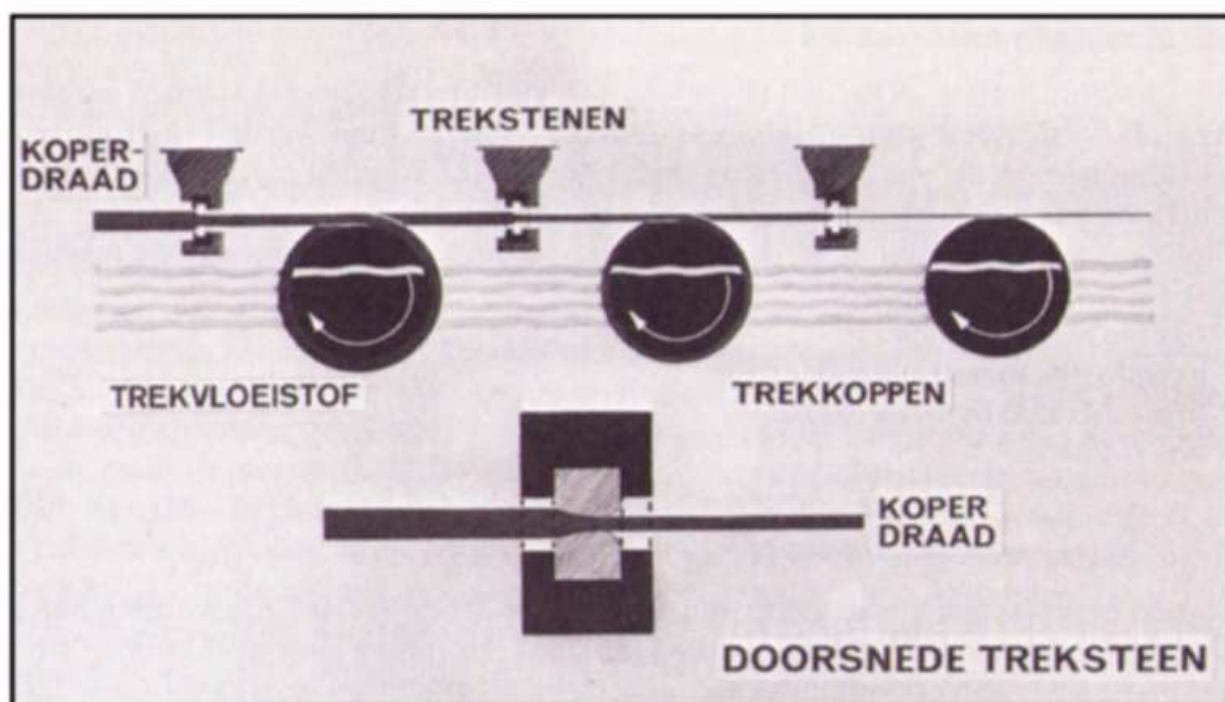


Fig. 2-1

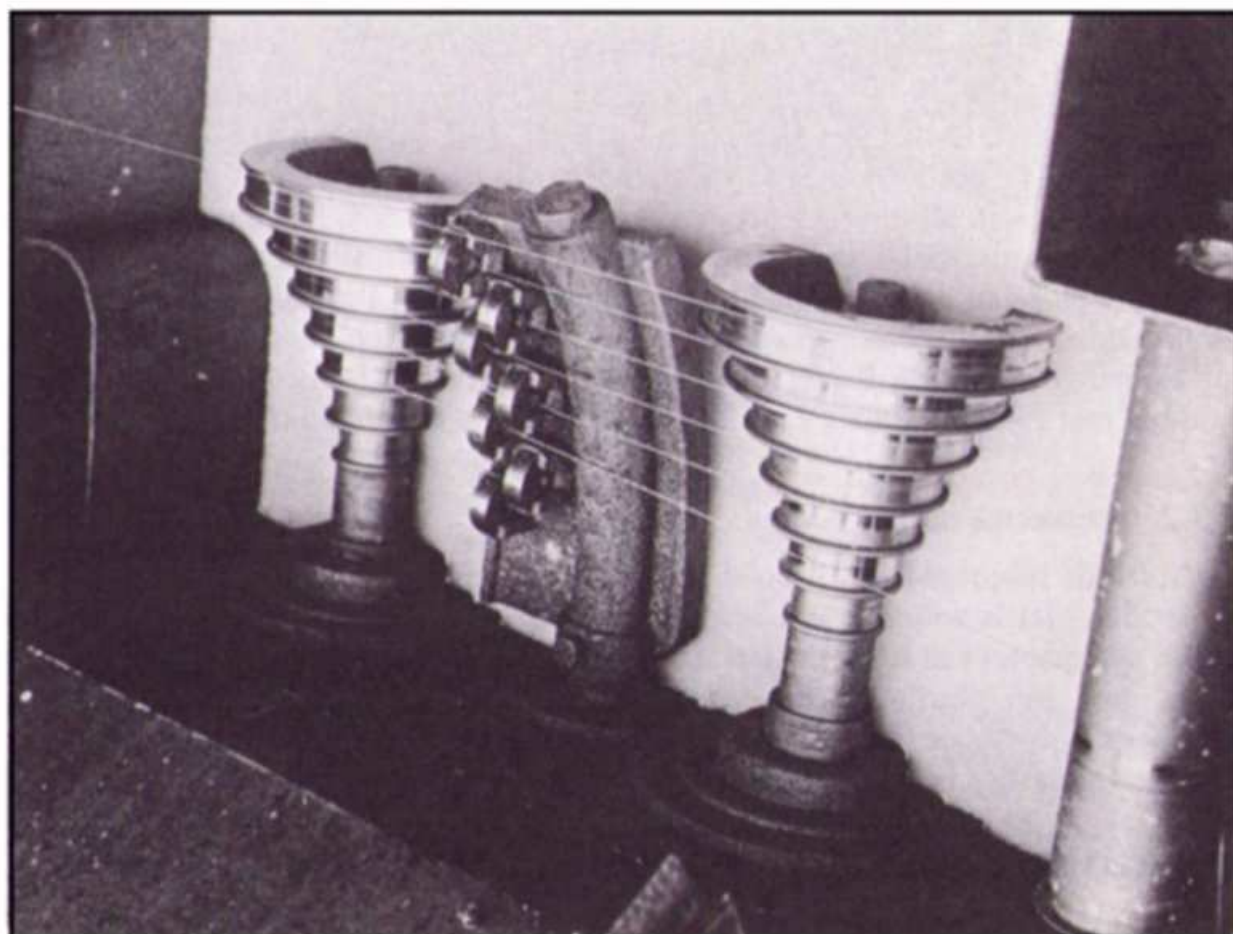


Fig. 2-2. Een meervoudige fijntrekbank (foto NKF).

2.3. Montage- en wikkeldraad

De draadsoorten die in de eerste hoofdgroep zijn ondergebracht, kunnen worden verdeeld in flexibele en niet-flexibele draden. Beide soorten worden in grote verscheidenheid op de markt gebracht, zodat hier wordt volstaan met een globale beschrijving van de meest gebruikte soorten.

Niet-flexibele draad wordt in de elektronica toegepast voor montage- en installatiewerk en is te verdelen in:

- blanke montagedraad;
- geïsoleerde montagedraad;
- afgeschermd montagedraad;
- wikkeldraad.

2.3.1. Blanke montagedraad

Blanke montagedraad is te gebruiken als de betreffende verbindingen buiten handbereik worden aangebracht, dan wel alleen door deskundig personeel kunnen worden benaderd. Een uitzondering hierop vormen schakelingen waarbij met zeer lage spanningen wordt gewerkt, bijv. batterijspanningen. In alle andere gevallen is het raadzaam om de draad te isoleren door er isolatiekous overheen te schuiven. De draad zelf bestaat gewoonlijk uit massief koperdraad, al dan niet voorzien van een laagje zilver of tin.

Een zilveren bekleding (silver coating) wordt hoofdzakelijk geëist, wanneer het gaat om toepassing in schakelingen waarbij hoogfrequente wisselstromen optreden; dit in verband met het skin- of huideffect. Het vertinnen van de koperdraad vergemakkelijkt het werken met zachtsoldeer. Isolatiekous bestaat gewoonlijk uit een holle buis van plastic bijv. polyvinylchloride of Teflon*. Beide materialen hebben een hoge specifieke weerstand en zijn bestand tegen alle in de elektronica gebruikte oplos- en reinigingsmiddelen, alsmede een hoge graad van vochtigheid. Isolatiekous is verkrijgbaar in een groot aantal diameters en uiteenlopende kleuren en kleurencombinaties. Bij de toepassing dient echter wel rekening te worden gehouden met eventuele vochtvorming tussen draad en isolatiekous.

2.3.2. Geïsoleerde montagedraad

Geïsoleerde montagedraad bestaat uit een massieve kern van elektrolytisch koper, die al dan niet is voorzien van een laagje zilver of tin. Om deze draad is door extrusie een mantel van isolatiemateriaal aangebracht. In de elektronica wordt vooral draad met een plastic isolatie verwerkt en wel voornamelijk polyvinylchloride (PVC) en polyetheen (PE). Opgemerkt zij nog dat veel fabrikanten van dit materiaal hun eigen plastics hebben ontwikkeld. Zo voert de firma DRAKA bijv. drakavinyl (ontwikkeld op basis van PVC) en dravulteen (ontwikkeld op basis van geïsoleerd polyetheen).

* Teflon is een geregistreerd handelsmerk van Dupont.

PVC isolatie wordt in Nederland hoofdzakelijk gebruikt voor spanningen lager dan 6 kV, terwijl PE in de regel wordt toegepast voor spanningen hoger dan 6 kV. Indien de isolatie bestand moet zijn tegen temperaturen hoger dan 75 °C (bijv. 90 °C) komt ge vulcaniseerd PE in aanmerking als isolatiemateriaal.

PVC is in wezen een hard materiaal dat door een zgn. weekmaker soepel wordt gehouden. Er dient dan ook te worden gewaakt tegen langdurige verwarming als gevolg van een te hoge stroomsterkte en/of een te hoge omgevingstemperatuur, aangezien de weekmaker in dat geval verdampt en het materiaal weer hard en broos wordt. De maximaal toelaatbare temperatuur van PVC bedraagt ongeveer 75 °C. Het materiaal is echter een zeer goede elektrische isolator en bestand tegen tropische invloeden zoals een hoge vochtigheidsgraad en de vorming van schimmel. Zoals reeds eerder vermeld, wordt de isolatie op extrusiemachines om de koperen kern aangebracht, waardoor deze geheel wordt omgeven door het isolatiemateriaal. Vochtvorming tussen kern en isolatie is dan ook uitgesloten. Verder wordt nog de eis gesteld dat de isolatie gemakkelijk moet kunnen worden verwijderd, bijv. met een draadstriptang. Geïsoleerde montagedraad is leverbaar in verschillende diameters en een groot aantal kleuren en kleurencombinaties.

2.3.3. Afgeschermdde montagedraad

Bij afgeschermdde montagedraad is de geïsoleerde koperen kern omgeven door een metalen afscherming, die gewoonlijk bestaat uit vertind koperdraad dat in de vorm van een buis is geweven. Deze draadsoort wordt o.a. gebruikt op plaatsen waar storingen door ongewenste signalen van buitenaf zijn te verwachten. De afscherming dient op een of meer plaatsen met massa te worden verbonden. In fig. 2–3 is een dergelijke draad afgebeeld.

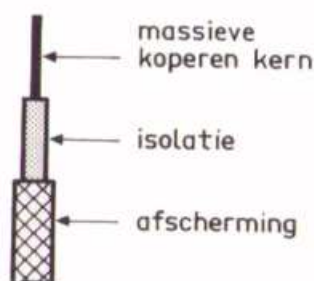


Fig. 2–3

2.3.4. Wikkeldraad

Wikkeldraad, vaak ten onrechte aangeduid als emaildraad, is de algemene aanduiding voor de draadsoorten die worden gebruikt voor het wikkelen van spoelen voor transformatoren en motoren. De isolatie bestaat uit een of meer lagen moffellak, die in een speciale oven op de draad wordt gebrand. De isolatie mag, ook bij buiging onder een scherpe hoek, niet van de draad loslaten. De lak is bij montage-werkzaamheden van de draad te verwijderen door:

- schoonkrabben met een mes,
- wegbranden met een spiritusvlam.

Wikkeldraad wordt ook met katoen- en zijde-isolatie in de handel gebracht, terwijl ook isolatie op basis van vinylacetaat ingang vindt.

2.3.5. Flexibele montagedraad

In tegenstelling tot niet-flexibele montagedraad (in de Engelse literatuur veelal aangeduid als hook-up wire) is flexibele draad gemakkelijk in alle vormen te buigen, doch zal deze vormen niet behouden, aangezien de draad zeer soepel is. De kern is samengesteld uit een aantal dunne draadjes, die al dan niet zijn getwist. Bij kleine doorsneden van de kern zijn deze draadjes vertind, terwijl ze bij grotere doorsneden blank zijn. In fig. 2-4 is een stukje flexibel montagedraad afgebeeld.

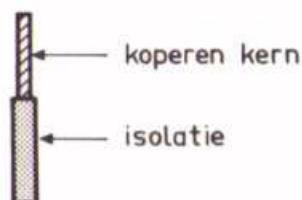


Fig. 2-4

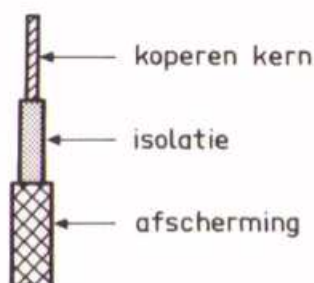


Fig. 2-5

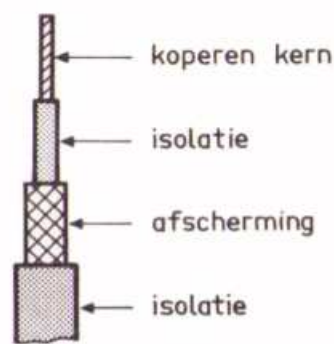


Fig. 2-6

Als isolatiemateriaal wordt gewoonlijk plastic gebruikt, waarvan PVC, PE en teflon de voornaamste zijn. Nylon wordt toegepast als de isolatie doorschijnend moet zijn en de kerndoorsnede gering is. De telefoonaansluiting van hoorapparaten bestaat gewoonlijk uit zeer flexibele draad met nylon-isolatie. Dit om een voorbeeld te noemen. Asbest-isolatie wordt alleen toegepast als met grote stroomsterkten wordt gewerkt en rekening moet worden gehouden met eventueel optredende vuurverschijnselen. Voorbeelden van toepassing zijn puntlasmachines en elektrische ovens.

Flexibele montagedraad is ook afgeschermd, dus voorzien van een geweven metaal kous (zie fig. 2-5) en geïsoleerd afgeschermd (zie fig. 2-6) verkrijgbaar. Bij laatstgenoemde draadsoort is de afscherming nog extra voorzien van een mantel bestaande uit isolatiemateriaal. Gewoonlijk weer PVC, PE of Teflon.

Teflon is bestand tegen hoge temperaturen en smelt bijv. niet bij aanraking met een soldeerbout.

2.4. Verbindingskabels en netsnoeren

Het materiaal dat in deze hoofdgroep is ondergebracht kan direct worden gesplitst in netsnoeren en niet-netsnoeren. Eerstgenoemde snoeren zijn leverbaar in twee- en drie-aderige uitvoering. Bij drie-aderig netsnoer fungeert de derde draad als aarddraad. Grote huishoudelijke apparaten, zoals wasmachines en koelkasten,

moeten vanwege de veiligheid worden geaard, zodat bij deze produkten drie-aderig netsnoer met bijbehorende steker dient te worden gebruikt. Voor kleine huishoudelijke apparaten, zoals koffiemolens, mixers en messenslijpers, is aarding niet vereist en wordt overwegend dubbelgeïsoleerd twee-aderig netsnoer toegepast. Tweelingsnoer dat meer flexibel is dan dubbelgeïsoleerd snoer, wordt vrij veel toegepast als aansluitsnoer voor verlichtingsornamenten en schemerlampen. Een speciaal soort netsnoeren vormen de zgn. krulsnoeren, die vooral bij elektrische scheerapparaten, etc. ingang hebben gevonden. Krulsnoeren worden ook veelvuldig in de laagspanningstechniek toegepast o.a. bij telefoontoestellen en verbindingen van hoofdtelefoons. In fig. 2-7 is een dergelijk snoer afgebeeld.



Fig. 2-7

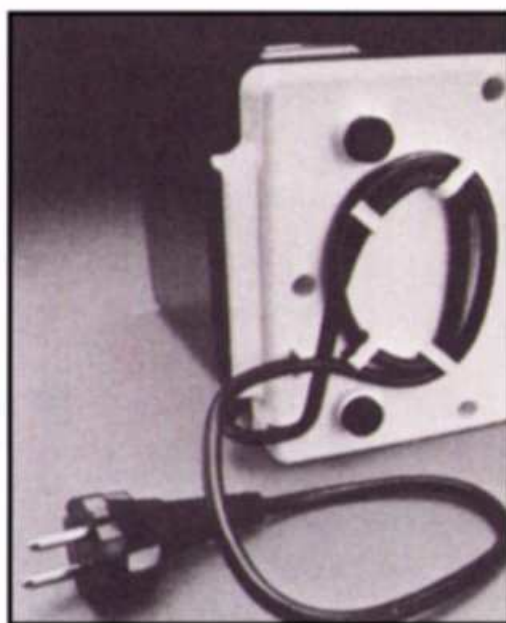


Fig. 2-8

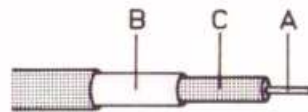
De isolatie van al deze netsnoeren bestaat gewoonlijk uit één of meer lagen PVC. Aansluitsnoeren van stofzuigers en vloerboenders, die zeer flexibel moeten zijn, hebben veelal een isolatie van butylrubber. Opgemerkt zij nog dat netsnoeren tegenwoordig met een aangespoten steker in de handel worden gebracht (zie fig. 2-8).

In veel landen worden strenge veiligheidseisen aan netsnoeren gesteld. Vaak mogen alleen snoeren worden gebruikt, die zijn voorzien van het merkteken van het landelijke keurbureau. Verbindingskabels worden in grote verscheidenheid op de markt gebracht en bezitten twee tot twintig en meer geïsoleerde aders. Er zijn ook uitvoeringen verkrijgbaar waarbij één of meer aders zijn afgeschermd.

2.5. Leidingen voor HF-signalen, golfweerstand

Bij dit materiaal dient, dit in tegenstelling tot de reeds behandelde draad- en kabelsoorten, wel degelijk rekening te worden gehouden met de zelfinductie, de capaciteit en het huideffect. In fig. 2-9 is een kabel afgebeeld, zoals die wordt gebruikt voor de overdracht van hoogfrequente signalen. Er valt hier direct het volgende op te merken:

1. beide signaalgeleiders zijn concentrisch t.o.v. elkaar opgesteld (de afstand tussen beide is overal even groot),
2. tussen beide signaalgeleiders bevindt zich isolatiemateriaal.



A - binnengeleider
B - buitengeleider
C - isolatie tussen beide geleiders

Fig. 2-9

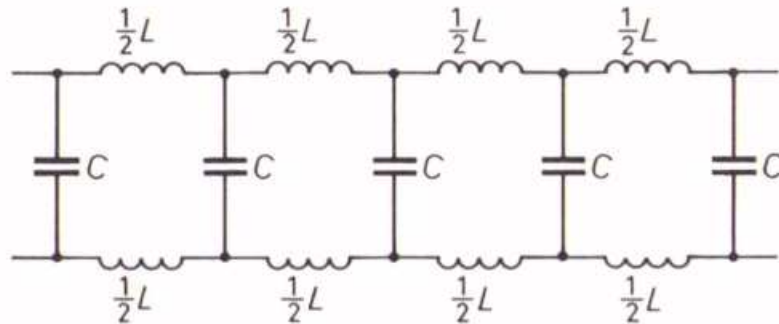


Fig. 2-10

Elektrisch gezien kan een dergelijke leiding, zij het bij benadering, worden vervangen door een netwerk van zelfinducties en capaciteiten. Het vervangschema ziet er dan uit als afgebeeld in fig. 2-10.

De zelfinducties, in de figuur aangegeven met $\frac{1}{2}L$, zijn die welke behoren bij één rechte signaalgeleider per eenheid van lengte. De aangegeven capaciteiten hebben betrekking op de vervangcapaciteit tussen de beide geleiders, eveneens per eenheid van lengte. Opgemerkt zij nog dat zowel de gelijkstroomweerstand als de HF wisselstroomweerstand, de laatste als gevolg van het huideffect, zijn verwaarloosd. Genoemde zelfinducties en capaciteiten vormen gezamenlijk een reactantie, waarvan de grootte kenmerkend is voor de soort leiding. Deze reactantie wordt gewoonlijk aangeduid als de karakteristieke impedantie en wordt aangegeven met de hoofdletter Z . Er wordt hier gesproken van impedantie en niet van reactantie om-

dat eigenlijk ook de eerdergenoemde weerstanden in rekening moeten worden gebracht.

Hoe groot is de karakteristieke impedantie van een dergelijke leiding?

Wordt een oneindig lange leiding op een gelijkspanning aangesloten, dan heerst er tussen de beide signaalgeleiders een spanning van U volt. Door de geleiders vloeit nu een gelijkstroom van i ampere. De relatie tussen U en i wordt dan weergegeven door de formule:

$$U = L \frac{i}{t} \quad (1)$$

$$[U \dots (\text{V}); L \dots (\text{H}); i \dots (\text{A}); t \dots (\text{s})]$$

Uit de elektrostatica volgt verder dat:

$$U = \frac{i \cdot t}{C}$$

$$[U \dots (\text{V}); i \dots (\text{A}); t \dots (\text{s}); C \dots (\text{F})] \quad (2)$$

Substitutie van (1) in (2) geeft na enige bewerking

$$\frac{U^2}{i^2} = \frac{L}{C}$$

of

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Dit is dus de grootte van de karakteristieke impedantie, ook wel golfweerstand genoemd, van de betreffende oneindig lange leiding.

Is de leiding niet oneindig lang, wat in de praktijk het geval is, dan gedraagt deze leiding zich toch als een oneindig lange leiding als ze is afgesloten met een weerstand waarvan de grootte gelijk is aan de karakteristieke impedantie.

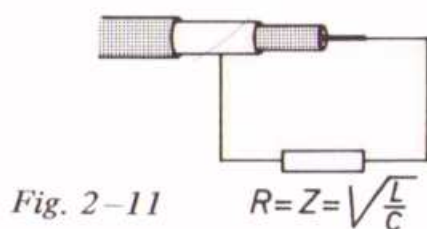


Fig. 2-11

Er treden in dat geval geen ongewenste nevenverschijnselen op zoals reflecties, die onder bepaalde omstandigheden zeer hinderlijk kunnen zijn en bij grotere vermogens zelfs aanleiding kunnen geven tot doorslag van de isolatie. In fig. 2-11 is een HF leiding afgebeeld, die is afgesloten met een weerstand R . De grootte van deze weerstand is gelijk aan de karakteristieke impedantie Z van de betreffende

leiding. Elektrisch gezien gedraagt de leiding zich nu niet meer als een stuk kabel, doch als een oneindig lange leiding. Dit laatste houdt in dat er o.a. geen reflecties meer optreden.

2.6. Damping

In bovengenoemde leiding treedt vanzelfsprekend energieverlies op. Dit heeft zowel betrekking op de beide signaalgeleiders als het isolatiemateriaal tussen deze geleiders.

De gelijkstroomweerstand van de signaalgeleiders is te berekenen met de bekende formule:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A}$$

Hierin is:

R de gelijkstroomweerstand van één geleider in ohm;

l de lengte van één geleider in cm;

A de doorsnede van één geleider in cm^2 ;

ρ de specifieke weerstand van het materiaal waaruit de geleider bestaat in $\Omega \text{ cm}$.

De wisselstroomweerstand als gevolg van het huideffect is te berekenen met de formule:

$$R_{\text{hf}} = \frac{l \sqrt{\rho \cdot f}}{5030 \pi \cdot d}$$

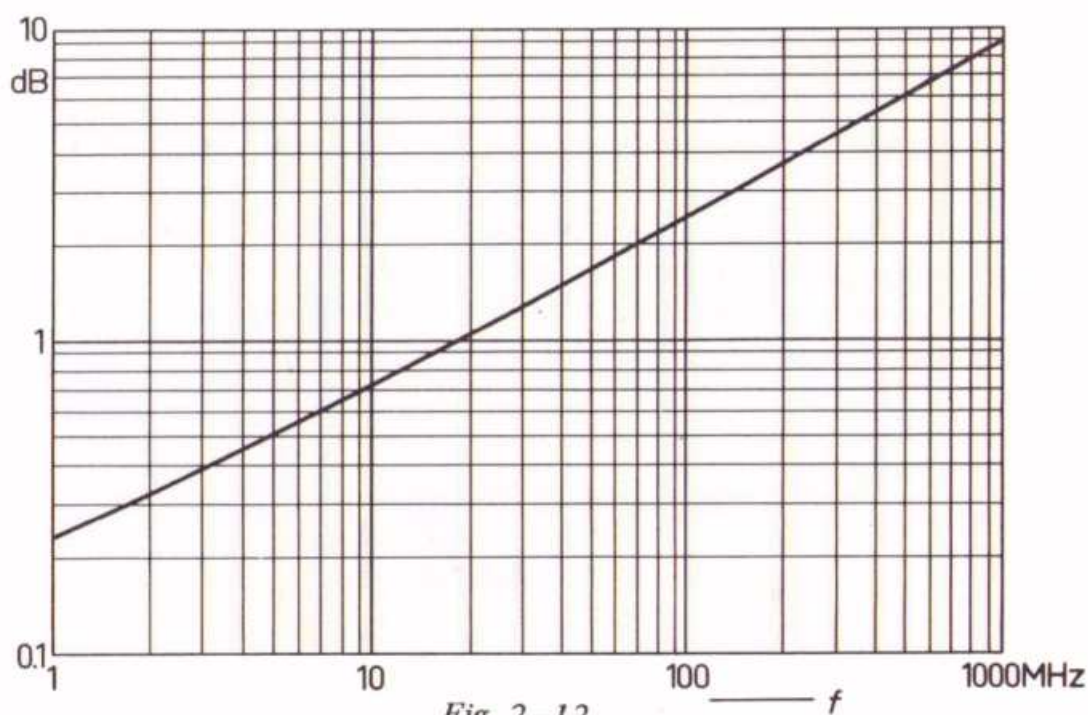
$$[R_{\text{hf}} \dots (\Omega); l \dots (\text{cm}); \rho \dots (\Omega \text{ cm}); f \dots (\text{Hz}); d \dots (\text{cm})]$$

Verder zullen er nog verliezen in het isolatiemateriaal optreden, die toenemen naarmate de frequentie van het HF signaal hoger wordt. Deze verliezen laten zich echter niet gemakkelijk berekenen.

Wordt aan een HF leiding een vermogen van N_1 watt toegevoerd, terwijl aan de andere zijde van de betreffende leiding een vermogen van N_2 watt aanwezig is, dan betekent dit dat een vermogen van $(N_1 - N_2)$ watt in die leiding verloren gaat, d.w.z. in warmte wordt omgezet. Onder de damping van een leiding wordt per definitie verstaan de verhouding:

$$10 \log \frac{N_1}{N_2} \text{ bij een lengte van 100 meter.}$$

De damping wordt zodoende uitgedrukt in decibels (dB). Het zal na het voorgaande duidelijk zijn dat bij de publikatie van de damping steeds de frequentie van het desbetreffende HF signaal moet worden vermeld. De verliezen hebben nl. betrekking op de weerstand, die op zijn beurt weer in belangrijke mate wordt bepaald door de frequentie van het HF signaal. In fig. 2-12 is op dubbel logaritmische schaal het verband aangegeven tussen de damping van een dergelijke leiding en frequentie van het HF signaal waarop deze damping betrekking heeft.



In de telefoontechniek wordt de eenheid „neper” gebruikt om de demping van een leiding aan te geven. Het aantal neper is dan gelijk aan de verhouding:

$$\ln \frac{N_1}{N_2} \text{ bij een lengte van 100 meter.}$$

Het enige verschil bestaat dus uit het feit dat bij de neper met natuurlijke logaritmen wordt gewerkt en in het andere geval met gewone (Briggiaanse) logaritmen.

2.7. Coaxiale kabel

In fig. 2-13 is een coaxiale (coax) kabel afgebeeld. Een dergelijke kabel bestaat uit een massieve binnengeleider van elektrolytisch koper en een buitengeleider, die wordt gevormd door koperfolie dat in de lengterichting met overlap strak over de isolatie is gevouwen, dan wel met de randen gestuikt tegen elkaar ligt. Soms is genoemde folie nog extra verzilverd. Opgemerkt zij nog dat er ook coax kabels in de handel zijn, waarbij de buitengeleider uit gevlochten koperdraad dan wel aluminiumfolie bestaat.

De isolatie tussen binnen- en buitengeleider bestaat gewoonlijk uit polyetheen, soms massief doch veelal zijn dit schijfjes die op een bepaalde afstand van elkaar

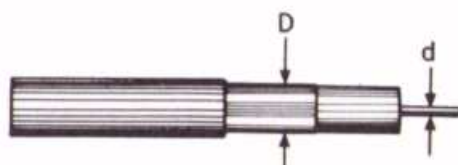


Fig. 2-13

op de binnengeleider zijn aangebracht. Het geheel van binnen- en buitengeleider is omgeven door een mantel van isolatiemateriaal, veelal eveneens polyetheen. (Bij bepaalde uitvoeringen worden om de buitengeleider eerst nog twee lagen staalband gewikkeld, terwille van een goede mechanische sterkte en elektromagnetische afscherming). Speciaal bij de kabels die worden ingegraven, wordt om genoemde mantel van isolatiemateriaal nog een pantsering van bijv. twee lagen staalband aangebracht, waaromheen dan weer een mantel van polyetheen is gespoten. In fig. 2-14 is een coax kabel afgebeeld, die is voorzien van een stalen draagkabel. Deze kabels worden o.a. toegepast bij centrale antenne inrichtingen, waarbij afstanden tussen gebouwen bovengronds moeten worden overbrugd.



Fig. 2-14

De karakteristieke impedantie van coax kabels is te berekenen met de formule:

$$Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d}$$

(zie ook fig. 2-13)

en wordt dus bepaald door de buitendiameter van de binnengeleider (d) en de binnendiameter van de buitengeleider (D), alsmede het diëlektricum tussen beide geleiders. Enkele veel voorkomende waarden zijn 50, 60 en 75 ohm.

De capaciteit in pF/m bedraagt:

$$C = \frac{24,1 \epsilon_r}{\log \frac{D}{d}}$$

De snelheid waarmee het elektrisch signaal zich langs de kabel voortplant, is lager dan de lichtsnelheid en wordt in belangrijke mate bepaald door de relatieve diëlektrische constante van het isolatiemateriaal. De kabelfabrikant geeft gewoonlijk de relatieve voortplantingssnelheid (ook wel verkortingsfactor genoemd) op, d.i. de verhouding tussen de voortplantingssnelheid van het elektrische signaal in de kabel en de lichtsnelheid. De grootte van de relatieve voortplantingssnelheid bedraagt bij de meeste coax kabels gewoonlijk 0,6–0,9. Tussen de relatieve diëlektrische constante ϵ_r en de relatieve voortplantingssnelheid ϑ_r bestaat de relatie:

$$\vartheta_r = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

2.8. Bamboekabel

Een speciaal soort coaxiale kabels vormen de zgn. bamboekabels, zo genoemd omdat de constructie veel overeenkomst vertoont met bamboe. Bij deze kabels bestaat de isolatie tussen de binnen- en de buitengeleider voor een groot deel uit lucht, waardoor de diëlektrische verliezen tot een minimum worden gereduceerd en de kabel gemakkelijker is te buigen. In fig. 2-15 is een dergelijke kabel afgebeeld (deels opengewerkt). Uit deze figuur blijkt dat het diëlektricum een buis van polyetheen is, die door schijfjes van hetzelfde materiaal op gelijke afstand wordt gehouden van de binnengeleider. De onderlinge afstand tussen de schijfjes is daarbij overal gelijk. Buis en schijfjes van isolatiemateriaal zijn op de aanrakingsplaatsen met elkaar versmolten, waardoor een waterdichte constructie wordt verkregen. Een belangrijk voordeel van bamboekabel is het geringere gewicht door de besparing aan isolatiemateriaal.

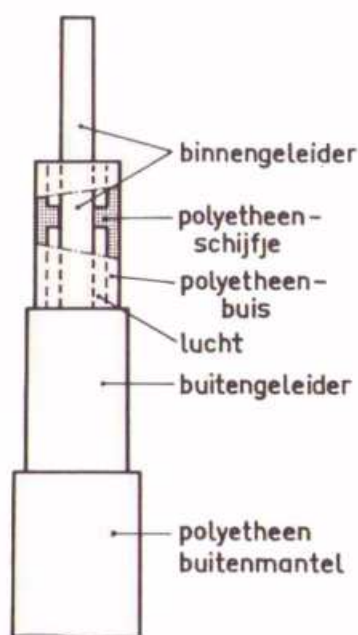


Fig. 2-15

Typische aanduidingen van dit soort coaxiale kabels zijn Bamboe 1 $\frac{1}{2}$, Bamboe 3 en Bamboe 6. De genoemde getallen hebben betrekking op de demping die per 100 m lengte optreedt bij een wisselspanning met een frequentie van 230 MHz. De getallen 1 $\frac{1}{2}$, 3 en 6 zijn daarbij afrondingen.

Opmerking: Coaxiale kabels met schijfjesisolatie voor hoogfrequenttelefonie zijn vrijwel altijd gebaseerd op de aanbevelingen van de CCITT en worden gewoonlijk aangeduid als 1,2/4,4 mm en 2,6/9,5 mm. Deze getallen geven resp. de diameter van de binnengeleider en de binnendiameter van de buitengeleider aan.

Bamboekabel is een produkt van de NKF. Andere kabelfabrikanten maken echter

eveneens kabels met een luchtkamer-isolatie-profiel. Zo brengt de firma POPE bijv. de S.A.S.kabel (SEMI-AIR-SPACE) uit.

In Nederland is de standaardkleur van coaxiale kabels die worden ingegraven groen. Dit geldt zowel voor gepantserde als niet-gepantserde kabels. Kabels voor bovengrondse toepassingen, zoals hangkabels, worden uitsluitend met een zwarte mantel uitgevoerd. Zwart polyetheen ondervindt namelijk geen nadelige invloeden van het zonlicht. De Nederlandse PTT heeft blauw als standaardkleur voor de door haar gebruikte kabels gekozen.

Enkele richtlijnen voor het werken met coaxiale kabels.

Bij het aanbrengen tegen muren e.d. dient erop te worden gelet dat goed passende niet te nauwe beugels worden toegepast. De kabel mag namelijk niet strak worden bevestigd tussen twee vaste punten, omdat een bepaalde bewegingsvrijheid noodzakelijk is in verband met lengtevariatiën als gevolg van temperatuursverschillen.

Voor de niet-langswaterdichte kabels moeten speciale maatregelen worden genomen om het indringen van vocht te voorkomen, zoals het volspuiten van de kabel-einden met siliconenvet. Moet een coaxkabel in een buis worden getrokken, dan dient met het volgende rekening te worden gehouden:

1. de trekkracht die op de kabel wordt uitgeoefend, mag in geen geval groter zijn dan de maximaal toelaatbare waarde, zoals die door de fabrikant wordt gepubliceerd.
2. worden glijmiddelen gebruikt, dan mogen deze de mantel van PVC of PE niet aantasten. Zo is bijv. het gebruik van zeep als glijmiddel niet toelaatbaar.

Het ophangen van kabels kan op verschillende manieren plaats vinden. Een eerste mogelijkheid is de toepassing van kabels met draaglitze (zie fig. 2-14). Ook kan vooraf een staaldraad worden gespannen. De coaxkabel wordt in dat geval met speciale klemmen aan de drager van staaldraad bevestigd.

2.9. Bandleiding

In fig. 2-16 is een stukje bandleiding afgebeeld. De leiding bestaat uit twee evenwijdige signaalgeleiders, die door eenzelfde soort isolatiemiddel, veelal polyetheen, op gelijke afstand van elkaar worden gehouden. Genoemde leiding wordt in twee uitvoeringen op de markt gebracht. Bij de ene uitvoering is de isolatie doorschijnend, terwijl het isolatiemateriaal bij de andere uitvoering meestal zwart is. Bandleiding met doorschijnend isolatiemateriaal heeft het nadeel dat het zonlicht erop inwerkt, waardoor de verliezen groter worden. Bij vriezende weer wordt de leiding zeer stug met als gevolg dat bij bewegingen, bijv. door de wind, kleine haarscheurtjes in het isolatiemateriaal optreden.

Deze scheurtjes trekken op hun beurt vocht aan, iets dat weer resulteert in een toename van de demping.

Transparante bandleiding wordt dan ook overwegend toegepast voor verbindingen binnenshuis. Bij de andere soort treden deze nadelen niet dan wel in veel geringere

mate op, vandaar dat dit materiaal geschikt is om als buitenleiding te worden toegepast. De beide signaalgeleiders bestaan elk uit een aantal niet-vertinde koperen draadjes om het geheel zo soepel mogelijk te houden.



Fig. 2-16

De karakteristieke impedantie van bandleiding is te berekenen met de formule:

$$Z = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{2S}{d} \quad (\text{zie fig. 2-16})$$

De capaciteit per meter bedraagt:

$$C = \frac{12,1 \epsilon_r}{\log \frac{2S}{d}} \text{ pF}$$

2.10. Buiskabel

Buiskabel, ook wel kokerleiding genoemd, wordt in twee uitvoeringen op de markt gebracht nl. als holle buiskabel en als buiskabel gevuld met schuimplastic. Bij deze kabels zijn de beide signaalgeleiders ondergebracht in een holle buis van polyetheen en elk samengesteld uit een aantal niet-vertinde koperen draadjes. In fig. 2-17 is een dergelijke kabel afgebeeld. T.o.v. bandleiding heeft buiskabel het voordeel dat de elektrische eigenschappen zoals verliezen iets gunstiger zijn, terwijl de vochtgevoeligheid aanzienlijk minder is.



Fig. 2-17

Nadelen van buiskabel zijn:

- lastig te monteren (zeker t.o.v. lintkabel),
- de afwerking vereist veel aandacht,
- duurder dan lintkabel.

Buiskabel wordt echter steeds minder verwerkt en vervangen door coaxkabel.

2.11. De draden in groep vier

De draden, die zijn ondergebracht in de vierde hoofdgroep, bezitten sterk uiteenlopende eigenschappen (veelal alleen mechanische eigenschappen, zoals tuidraden

van antennemasten) en lenen zich dan ook niet voor nadere beschouwing. Voor weerstandsdraad wordt verwezen naar het desbetreffende gedeelte van hoofdstuk drie.

2.12. Metingen aan HF-kabels

De belangrijkste metingen hebben betrekking op het bepalen van:

- de karakteristieke impedantie;
- de verliezen door demping.

In fig. 2-18 is een meetopstelling afgebeeld om de karakteristieke impedantie van een HF-leiding te bepalen.

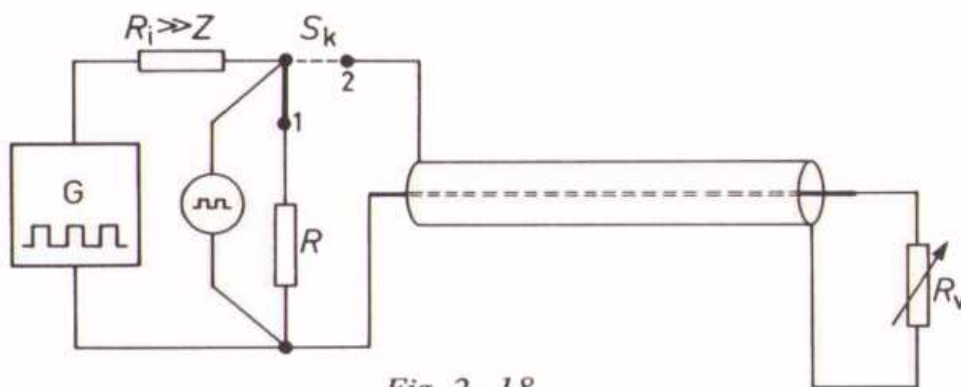


Fig. 2-18

De signaalgenerator G wordt nu zodanig ingesteld dat op het scherm van de oscilloscoop een kanteelspanning wordt geschreven als de schakelaar Sk zich in pos. 1 bevindt. Wordt deze schakelaar in pos. 2 gezet, dan blijkt dat de kanteelspanning vervormd is. Deze storing is toe te schrijven aan reflecties, die in de niet-oneindig lange leiding optreden. De regelbare weerstand R_v wordt nu zodanig ingesteld dat bovengenoemde vervorming verdwijnt. In dat geval is de waarde van R_v gelijk aan de karakteristieke impedantie van de kabel, die zich nu elektrisch gedraagt als een oneindig lange leiding (bij een oneindig lange leiding treden zoals bekend geen reflecties op).

In fig. 2-19 is een meetopstelling afgebeeld om de verliezen in de leiding te bepalen. Onder de demping worden de verliezen, uitgedrukt in dB, verstaan. Gewoonlijk hebben de desbetreffende getallen betrekking op een kabellengte van 100 m, zodat de demping van een HF-leiding wordt weergegeven door de verhouding:

$$10 \log \frac{N_1}{N_2} \text{ per 100 m lengte}$$

Bovenstaande verhouding is ook te schrijven als:

$$10 \log \frac{u_1^2/Z}{u_2^2/Z} = 20 \log \frac{u_1}{u_2} \text{ per 100 m.}$$

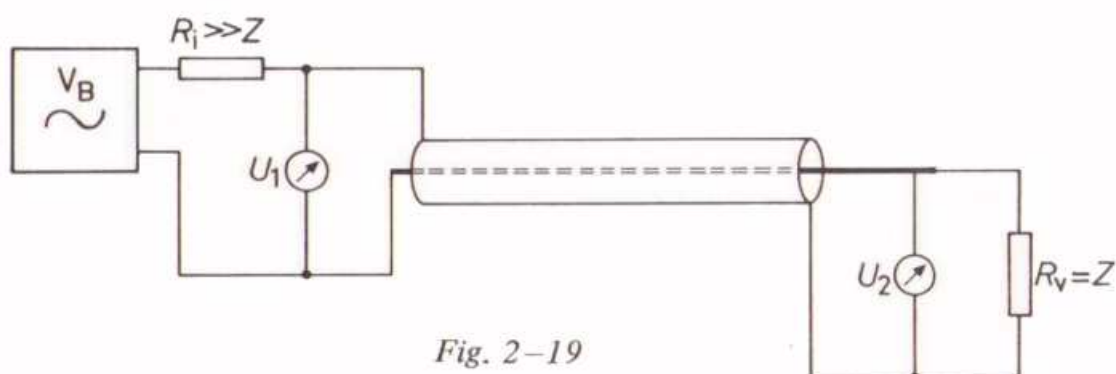


Fig. 2-19

Hierin is:

u_1 de spanning aan het begin van de leiding;

u_2 de spanning aan het einde van de leiding;

Z de karakteristieke impedantie van de leiding.

De demping is zodoende uitgedrukt in een verhouding van de spanningen aan de ingang en de uitgang van een leiding, die is afgesloten met een weerstand R_v , waarvan de grootte gelijk is aan de karakteristieke impedantie (Z).

De meting wordt uitgevoerd met een sinusvormige HF wisselspanning, die wordt geleverd door een signaalgenerator (V_B in fig. 2-19).

Bij het meetresultaat dient steeds de frequentie van deze wisselspanning te worden vermeld. Dus bijv. 4 dB bij 50 MHz. Indien de kabellengte bij de meting niet 100 meter bedraagt, dient de demping te worden omgerekend op een lengte van 100 m. De demping is echter recht evenredig met de lengte, zodat dit geen problemen geeft.

2.13. Glasvezelkabel

Bij de optische signaaloverdracht is licht de informatiedrager. Deze nieuwe manier van signaaltransmissie is mogelijk geworden door een combinatie van glasvezels met lage lichtverliezen, lasers die als een zeer sterke lichtbron dienst doen en uiterst gevoelige lichtdetectors, zoals lawine fotodioden. Elke vezel heeft een eigen lichtbron en een eigen lichtdetector. Bij proefnetten worden op deze wijze afstanden van ongeveer 15 km overbrugd, zonder dat signaalversterkers behoeven te worden gebruikt. In fig. 2-20 is een doorsnede van een dergelijke glasvezel afgebeeld.



Fig. 2-20



Fig. 2-21

Zoals uit de figuur is te zien, bestaat de signaalgeleider uit een kern en een mantel, die beide van glas zijn. Door een verschil in brekingsindex van beide glassoorten (de index van de mantel is lager dan die van de kern) wordt bewerkstelligd dat de lichtstralen die onder een kleinere hoek dan de grenshoek op de doorsnede van de

kern invallen in deze kern blijven en zich via reflecties tegen de kern/mantel overgang voortplanten (zie fig. 2-21).

Om absorptieverstrooiing van het licht in het glas te voorkomen, is het een vereiste dat tijdens het fabricageproces de vorming van onregelmatigheden en onzuiverheden tot een minimum wordt gereduceerd.

De glasvezels kunnen zowel van zachtglas als van kwartsglas worden gefabriceerd. Beide glassoorten voldoen nl. aan de gestelde eisen. De fabricage van zachtglas-

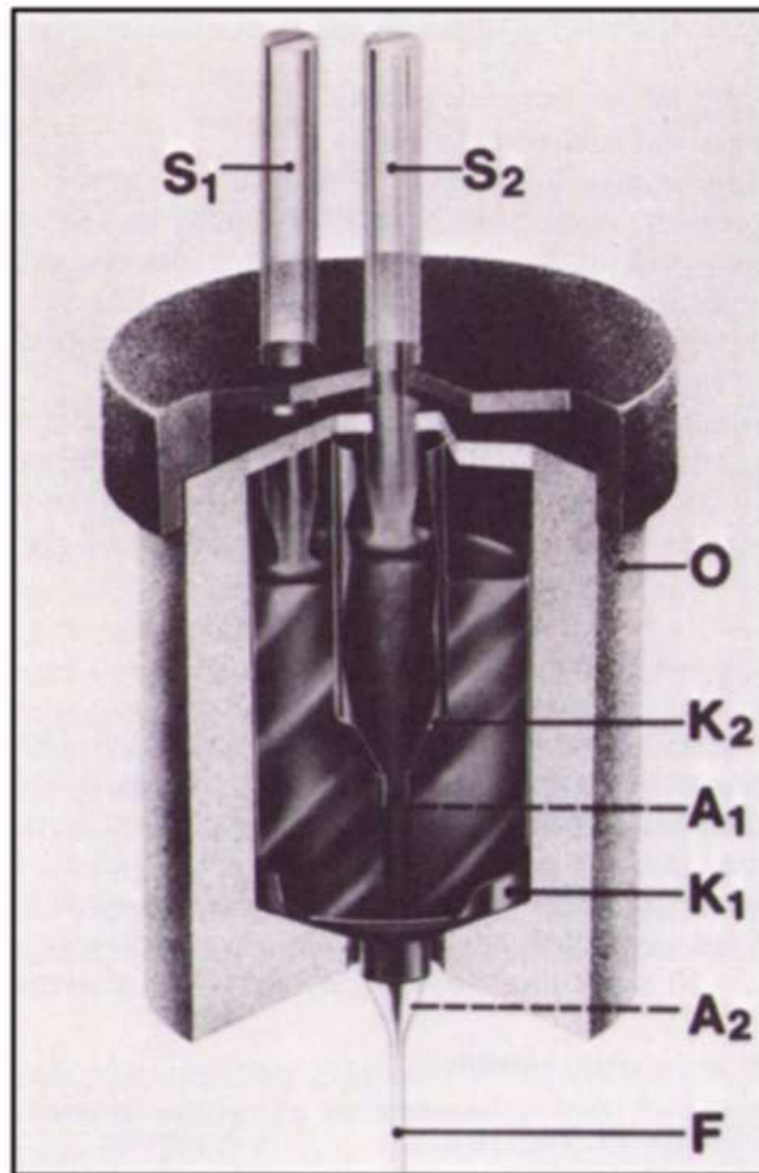


Fig. 2-22. Dubbele kroesinstallatie voor het trekken van zachtglasvezels (schematisch). K1 en K2 zijn twee concentrische kroezen van zuiver platina. Beide zijn geplaatst in een weerstandsoven O, die het glas op de juiste temperatuur smelt. Het glas wordt in de vorm van staven zuiver zachtglas met verschillende brekingsindex aan de kroezen toegevoerd (S1 en S2). Bij het uitstromen over het traject A1-A2 heeft een geringe vermenging van beide glassoorten plaats, waardoor het gewenste brekingsindexprofiel in de glasvezel ontstaat. F is de aldus gefabriceerde glasvezel.

vezels vindt continu plaats, hetgeen momenteel voor massafabricage een voordeel is. Kwartsglasvezels worden per lengte-eenheid gefabriceerd, waarbij een zeer grote zuiverheid van het materiaal wordt verkregen door speciale opdamptechnieken. Nadat de vezels zijn vervaardigd, worden ze bekleed met een laagje kunststof dat tot taak heeft om de vezel te beschermen tegen beschadiging en deze tegelijkertijd te verstevigen.

Om in een dergelijke vezel van zachtglas een continu verlopend indexprofiel te verkrijgen, wordt uitgegaan van twee glassoorten met een verschillende brekingsindex, waarbij de glassoort met de hogere index het centrale deel van de vezel vormt. De beide glassoorten worden staafvormig aan een dubbele kroes van platina toegevoerd. In fig. 2-22 is een doorsnede van een dergelijke kroes afgebeeld, waarbij de glasstaven zijn aangegeven met S1 en S2.

Bij voldoende hoge temperatuur (800°C) wordt het glas gesmolten. Een proces dat langzaam verloopt om te voorkomen dat zich bellen in het glas vormen. Bij het uitstromen vermengen de beide glassoorten zich iets met elkaar, waardoor het gewenste indexprofiel wordt verkregen.

Voor het fabriceren van kwartsglasvezels wordt gebruik gemaakt van een gasplasma.

De diameter van een dergelijke vezel bedraagt ongeveer $100\text{ }\mu\text{m}$. Een zeer belangrijk voordeel van de optische signaalgeleiding t.o.v. de elektrische signaaloverdracht is het ongevoelig zijn voor zowel elektrische als magnetische stoorvelden.

In de praktijk zal een kabel voor optische signaaloverdracht zijn samengesteld uit een aantal glasvezels en een aantal metalen draden die nodig zijn voor de voeding en de sturing van eventueel aanwezige optische signaalversterkers.

3. Lineaire weerstanden

3.1. Wat zijn lineaire weerstanden?

Lineaire weerstanden zijn weerstanden waarvan het quotiënt „spanning/stroom” voor verschillende waarden van de aangelegde spanning niet verandert, mits de temperatuur van de weerstand constant blijft. Een verdubbeling van de spanning over de weerstand resulteert dan ook in een tweemaal grotere stroom door die weerstand. In fig. 3—1 is de relatie tussen de spanning over een lineaire weerstand van $1000\ \Omega$ en de stroom, die als gevolg van deze spanning door de weerstand vloeit, in de vorm van een grafiek in beeld gebracht. Het gedrag van de weerstand wordt dan weergegeven door een rechte lijn, gaande door het punt 0 (snijpunt van stroom- en spanningsas).

De negatieve waarden van de stroom en de spanning hebben betrekking op een verandering van de polariteit van de spanning over de weerstand. Uit de grafiek blijkt dat een verandering van de polariteit geen invloed heeft op de verhouding „spanning/stroom”, aangezien de stroom door de weerstand in dat geval eveneens

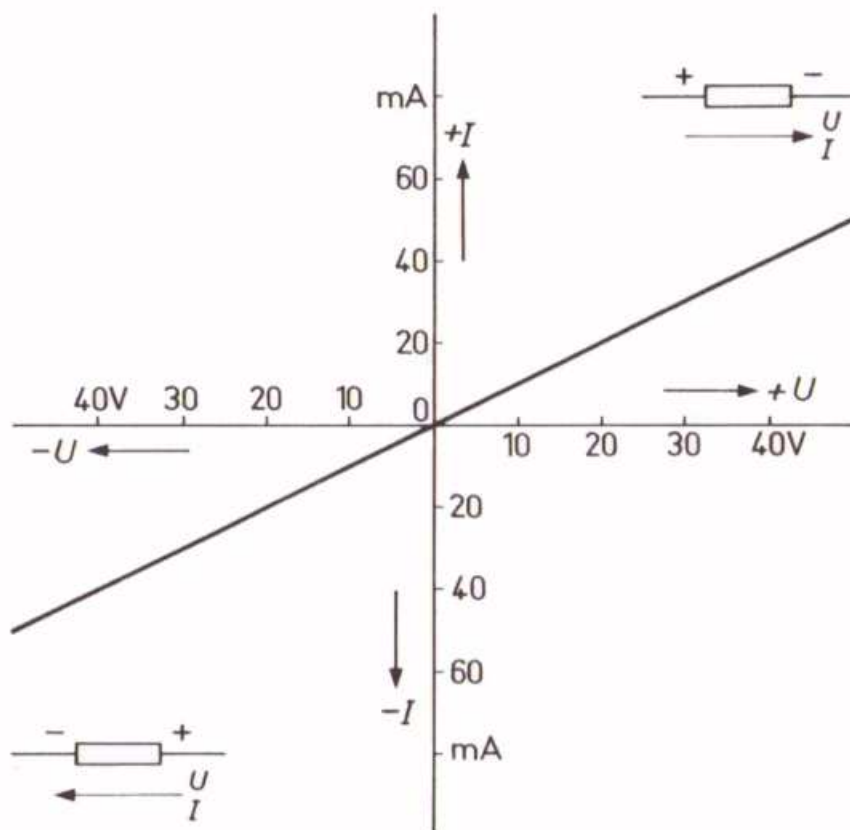


Fig. 3—1

van richting verandert. De helling van de lijn die het gedrag van de weerstand weergeeft, wordt bepaald door de grootte van de weerstandswaarde en wordt kleiner naarmate de weerstand groter wordt.

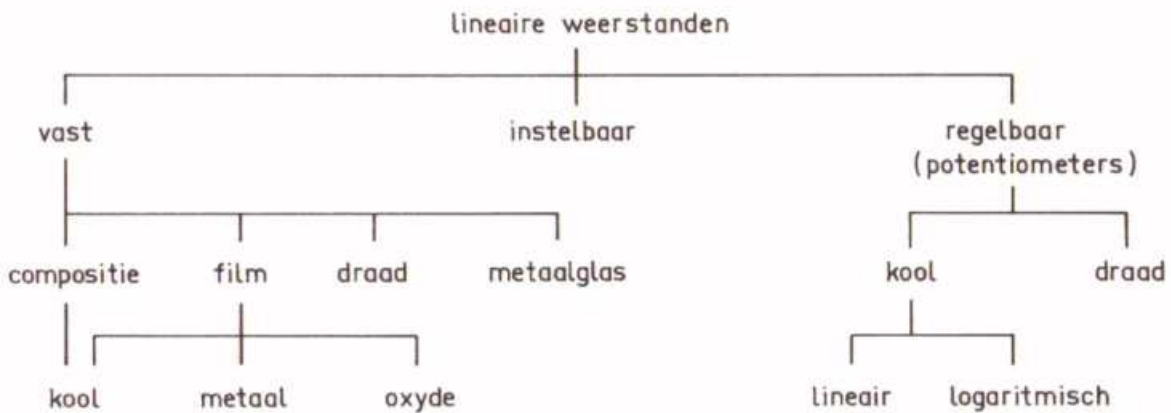
Lineaire weerstanden worden in eerste instantie toegepast voor spanningsdeling en stroombegrenzing. De vereiste weerstandswaarden worden in dat geval berekend met de bekende wetten van Ohm en Kirchhoff en vervolgens afgerond op de nabij gelegen standaardwaarde.

3.2. Groepsindeling

Functioneel zijn de lineaire weerstanden in drie groepen onder te brengen:

- vaste weerstanden,
- instelbare weerstanden,
- regelbare weerstanden (potentiometers).

Zie overzicht 3-1.



Overzicht 3-1

De vaste weerstanden en de potentiometers kunnen aan de hand van de constructie nog verder worden onderverdeeld, zoals in genoemd overzicht is aangegeven.

Aan al deze weerstanden worden, afhankelijk van de toepassing, bepaalde eisen gesteld, die o.a. betrekking kunnen hebben op:

- de weerstandswaarde en de toelaatbare tolerantie,
- de stabiliteit en betrouwbaarheid,
- de ruis,
- het bestand zijn tegen bepaalde mechanische en/of klimatologische invloeden.

3.3. Weerstandswaarde en tolerantie

Omdat lineaire weerstanden door diverse firma's in grote aantallen worden gefabriceerd, zijn de weerstandswaarden gestandaardiseerd en in bepaalde reeksen ondergebracht. Dit leidt in eerste instantie tot een aanzienlijke beperking van het assortiment.

timent en werkt zodoende kostenbesparend voor zowel de fabrikant als de gebruiker.

Door het IEC zijn de zgn. E reeksen van weerstandswaarden opgesteld, die internationaal zijn geaccepteerd. Bij het samenstellen van deze reeksen werd uitgegaan van de eis dat een reeks van opeenvolgende weerstandswaarden wordt verkregen, waarbij geen hiaten mogen optreden wanneer de toegelaten tolerantie in rekening wordt gebracht.

Bedraagt de nominale waarde van een weerstand R_1 ohm en de toelaatbare tolerantie $\pm p\%$, dan is de hoogst toelaatbare weerstandswaarde $(R_1 + \frac{pR_1}{100})$ ohm. Deze waarde moet nu gelijk zijn aan de laagst toelaatbare weerstandswaarde van de volgende weerstand uit de reeks. Als de nominale waarde daarvan R_2 ohm is, bedraagt de laagst toelaatbare weerstandswaarde van deze weerstand $(R_2 - \frac{pR_2}{100})$ ohm.

Dit betekent dat volgens de gestelde eis:

$$R_1 + \frac{p}{100} R_1 = R_2 - \frac{p}{100} R_2$$

Na enig herleiden ontstaat dan de relatie:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + p/100}{1 - p/100}$$

Voorbeeld: Bij een tolerantie van $\pm 20\%$ bedraagt de verhouding tussen twee opeenvolgende nominale waarden volgens deze formule:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + 20/100}{1 - 20/100} = 1,5$$

Als de laagste nominale weerstandswaarde 10Ω is, zal de volgende waarde 15Ω zijn. De daarop volgende waarden van deze reeks zijn dan achtereenvolgens 22Ω , 33Ω , 47Ω , 68Ω en 100Ω . In fig. 3-2 is een gedeelte van deze reeks in beeld gebracht.

Aangezien het weerstandsgebied tussen 10Ω en 100Ω op deze wijze in zes stuk-

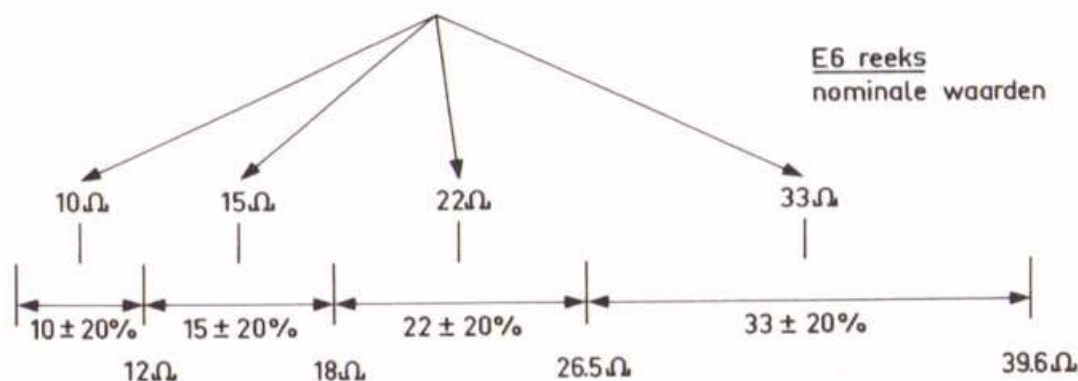


Fig. 3-2

ken wordt verdeeld, wordt deze reeks aangeduid als de E6 reeks. Bedraagt de tolerantie van de nominale waarde $\pm 5\%$, dan is de verhouding tussen twee opeenvolgende weerstandswaarden 1,1 en ontstaat de reeks $10\ \Omega$, $11\ \Omega$, $12\ \Omega$, ... In de nu volgende tabel zijn drie veel voorkomende E reeksen van weerstandswaarden afgedrukt.

Tabel 3–1

Reeks	E6	E12	E24
Tolerantie	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
Weerstandswaarden (Ω)	10	10	10
			11
		12	12
			13
	15	15	15
			16
		18	18
			20
	22	22	22
			24
		27	27
			30
	33	33	33
			36
		39	39
			43
	47	47	47
			51
		56	56
			62
	68	68	68
			75
		82	82
			91
	100	100	100

De weerstandswaarden tussen $100\ \Omega$ en $1000\ \Omega$ van bovenvermelde reeksen worden gevonden door de desbetreffende waarden tussen $10\ \Omega$ en $100\ \Omega$ met een factor 10 te vermenigvuldigen. Voor nog hogere waarden worden ze vermenigvuldigd met machten van 10, dus bijv. $15 \cdot 10^2 = 1500\ \Omega$, $15 \cdot 10^3 = 15\ 000\ \Omega$, $15 \cdot 10^4 = 150\ \text{k}\Omega$, $15 \cdot 10^5 = 1,5\ \text{M}\Omega$, enz.

3.4. Het maximaal toelaatbare vermogen

In een weerstand wordt elektrische energie omgezet in warmte. In het algemeen betekent dit dat de temperatuur van de weerstand zal stijgen en zodoende hoger

worden dan de omgevingstemperatuur. Is dit laatste het geval, dan gaat er een warmtestroom vloeien van de weerstand naar de omgeving. Er treedt echter op een gegeven ogenblik een evenwicht op tussen de hoeveelheid warmte die per tijdseenheid wordt ontwikkeld en de hoeveelheid warmte die per tijdseenheid wordt afgevoerd. Als deze toestand is bereikt, verandert de temperatuur van de weerstand niet meer.

Metingen tonen aan dat een weerstand het warmst wordt in een zone, die zich in het midden van de weerstand bevindt. De temperatuur van deze zone bepaalt dus de temperatuur die voor een goed en betrouwbaar functioneren nog mag worden toegelaten. Genoemde zone wordt in de vakliteratuur en catalogi gewoonlijk aangeduid als de hot-spot, zodat de maximaal toelaatbare temperatuur altijd betrekking heeft op de hot-spot temperatuur. Bij veel draadgewonden weerstanden bedraagt de hot-spot temperatuur $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bij de filmweerstand is deze temperatuur lager en varieert veelal tussen $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De hot-spot temperatuur (T_m) is gelijk aan de som van de omgevingstemperatuur (T_{omg}) en de stijging in temperatuur (ΔT) als gevolg van het elektrisch vermogen dat in de weerstand in warmte wordt omgezet:

$$T_m = T_{\text{omg}} + \Delta T$$

Wanneer T_m is bereikt en deze temperatuur niet meer verandert, is het toelaatbare vermogen bij de heersende omgevingstemperatuur maximaal. De warmtestroom die per tijdseenheid van de weerstand naar de omgeving vloeit, is nu even groot als de hoeveelheid warmte die per tijdseenheid in de weerstand wordt ontwikkeld en kan zodoende eveneens worden uitgedrukt in de eenheid watt. De grootte van de warmtestroom (P) is in dat geval gelijk aan:

$$P = \frac{T_m - T_{\text{omg}}}{R_{\text{th}}}$$

(thermische wet van Ohm)

R_{th} is de thermische weerstand, een rekengrootte, die echter geen constante waarde heeft, doch kleiner wordt naarmate de temperatuur oploopt. Bij temperaturen lager dan ongeveer $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ mag echter worden aangenomen dat R_{th} niet van waarde verandert.

Voorbeeld: Van een koolweerstand is gegeven dat een vermogen van $0,5\text{ W}$ in warmte wordt omgezet, terwijl de hot-spot temperatuur constant blijft en $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ bedraagt. De omgevingstemperatuur is $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. De thermische weerstand is nu als volgt te berekenen:

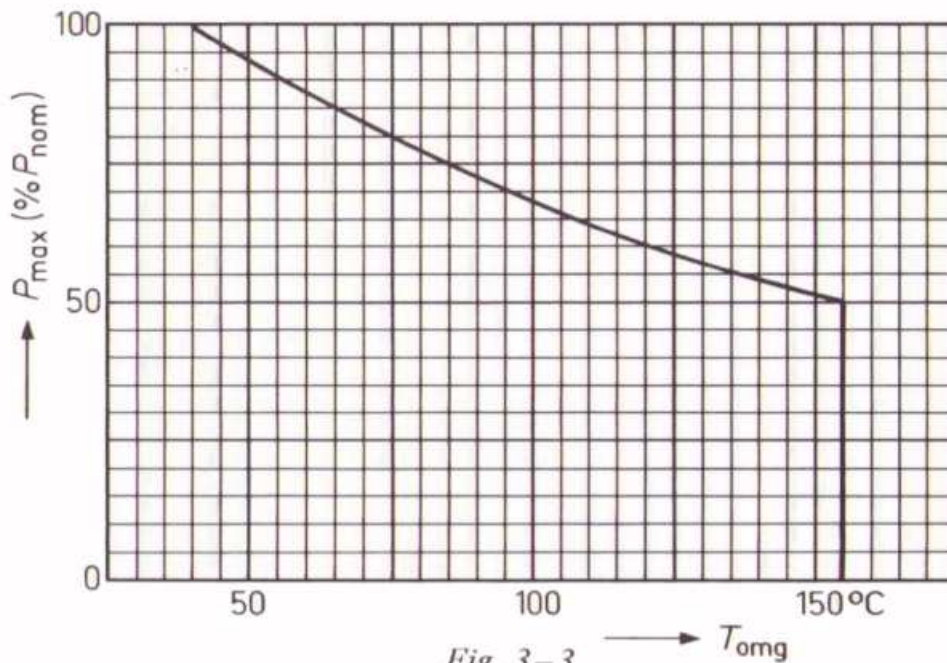
$$R_{\text{th}} = \frac{T_m - T_{\text{omg}}}{P} = \frac{120 - 20}{0,5} = 200\text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Bij een omgevingstemperatuur van 40 °C mag bij eenzelfde hotspot temperatuur

$$P = \frac{120-40}{200} = 0,4 \text{ W}$$

in warmte worden omgezet, of wel 0,1 W minder dan bij $T_{\text{omg}} = 20 \text{ °C}$.

De warmte-overdracht aan de omgeving vindt plaats door convectie (langsstromende lucht) en straling, alsmede door geleiding via de aansluitdraden. Hierbij neemt vooral de straling sterk toe naarmate de temperatuur van de weerstand stijgt, waarmee dan tevens het kleiner worden van R_{th} wordt verklaard. De afmetingen, het materiaal, de constructie en zij het in mindere mate de plaats en manier van monteren bepalen dus in belangrijke mate het maximaal toelaatbare vermogen bij een bepaalde omgevingstemperatuur. Genoemd vermogen zal echter aanzienlijk groter zijn wanneer de weerstand geforceerd wordt gekoeld, bijv. door een ventilator, dan wanneer de weerstand is ondergebracht in een kleine gesloten ruimte.



De fabrikant publiceert zeer vaak een grafiek die het verband aangeeft tussen enerzijds de omgevingstemperatuur en anderzijds het maximaal toelaatbare vermogen in procenten van het maximaal toelaatbare vermogen bij een bepaalde omgevingstemperatuur, veelal 40 °C (P_{nom}). In fig. 3-3 is een dergelijke grafiek afgebeeld. Bij 40 °C is het toelaatbare vermogen maximaal = 100% = P_{nom} , terwijl dit bij 120 °C is gedaald tot 60% van de gepubliceerde waarde bij 40 °C.

3.5. Het aangeven van de weerstandswaarde

De weerstandswaarde wordt soms op de weerstand aangegeven in de vorm van een gecombineerde cijfer/letter code. Een codering die daarbij door veel fabrikanten

wordt toegepast, bestaat uit het aanbrengen van de letters R, K en M in de weerstandswaarde. Genoemde letters komen dan in de plaats van een punt of een komma, waarbij de zo ontstane combinatie met een factor één moet worden vermenigvuldigd als deze letter een R, met een factor duizend als de letter een K en met een factor miljoen als de letter een M is.

Voorbeelden:

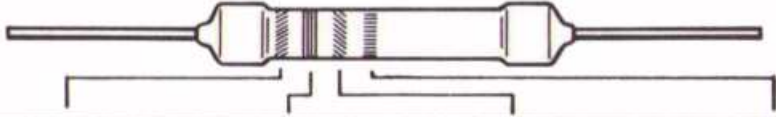
waarde	code	waarde	code
18 Ω	18R	15 000 Ω	15K
4,7 Ω	4R7	2 700 Ω	2K7
82 Ω	82R	1000 000 Ω	1M
1500 Ω	1K5	2700 000 Ω	2M7

De tolerantie van de weerstandswaarde wordt daarbij door een letter aangegeven.

letter	tolerantie	letter	tolerantie
—	± 20%	F	± 1%
K	± 10%	D	± 0,5%
J	± 5%	C	± 0,25%
G	± 2%	B	± 0,10%

Deze codering heeft echter het nadeel dat de weerstandswaarde slechts aan één zijde op de weerstand wordt aangebracht. Dit betekent dat bij de montage terdege

Tabel 3–2.

				
Kleur	1e ring	2e ring	3e ring	4e ring
	1e cijfer	2e cijfer	vermenigvuldigingsfaktor	tolerantie in %
zwart	0	0	1	—
bruin	1	1	10	± 1
rood	2	2	10 ²	± 2
oranje	3	3	10 ³	—
geel	4	4	10 ⁴	—
groen	5	5	10 ⁵	± 0,5
blauw	6	6	10 ⁶	—
violet	7	7	10 ⁷	—
grijs	8	8	—	—
wit	9	9	—	—
goud	—	—	10 ⁻¹	± 5
zilver	—	—	10 ⁻²	± 10

N.B.: Indien de vierde ring niet is aangebracht, heeft de weerstand een tolerantie van ± 20%.

rekening moet worden gehouden met het feit, dat de weerstandswaarde moet kunnen worden gecontroleerd zonder dat de weerstand behoeft te worden losgesoldeerd. Dit is dan ook één van de redenen dat tegenwoordig veelal een andere vorm van coderen wordt toegepast, nl. het aanbrengen van de weerstandswaarde en tolerantie in de vorm van gekleurde ringen. Laatstgenoemde codering wordt tegenwoordig vrijwel algemeen toegepast bij de filmweerstand.

In tabel 3-2 is de sleutel van deze kleurcode afgedrukt.

Voorbeeld: Op een weerstand zijn 4 gekleurde ringen aangebracht. De kleuren zijn resp.: rood, violet, oranje en zilver (gerekend vanaf het uiteinde van het weerstandslichaam naar het midden). De weerstandswaarde is dan 27 000 Ω , terwijl de tolerantie $\pm 10\%$ bedraagt.

3.6. Draadgewonden weerstanden

Deze weerstanden, meestal kortweg aangeduid als draadweerstand, bestaan uit een buisje of staafje van isolatiemateriaal waarop een laag weerstandsdraad is gewikkeld. De draad wordt daarbij stevig op de drager bevestigd. Bij de zgn. axiale weerstanden vindt dit plaats door over de uiteinden van de aldus gevormde weerstand een metalen kapje te klemmen. Zie fig. 3-4.

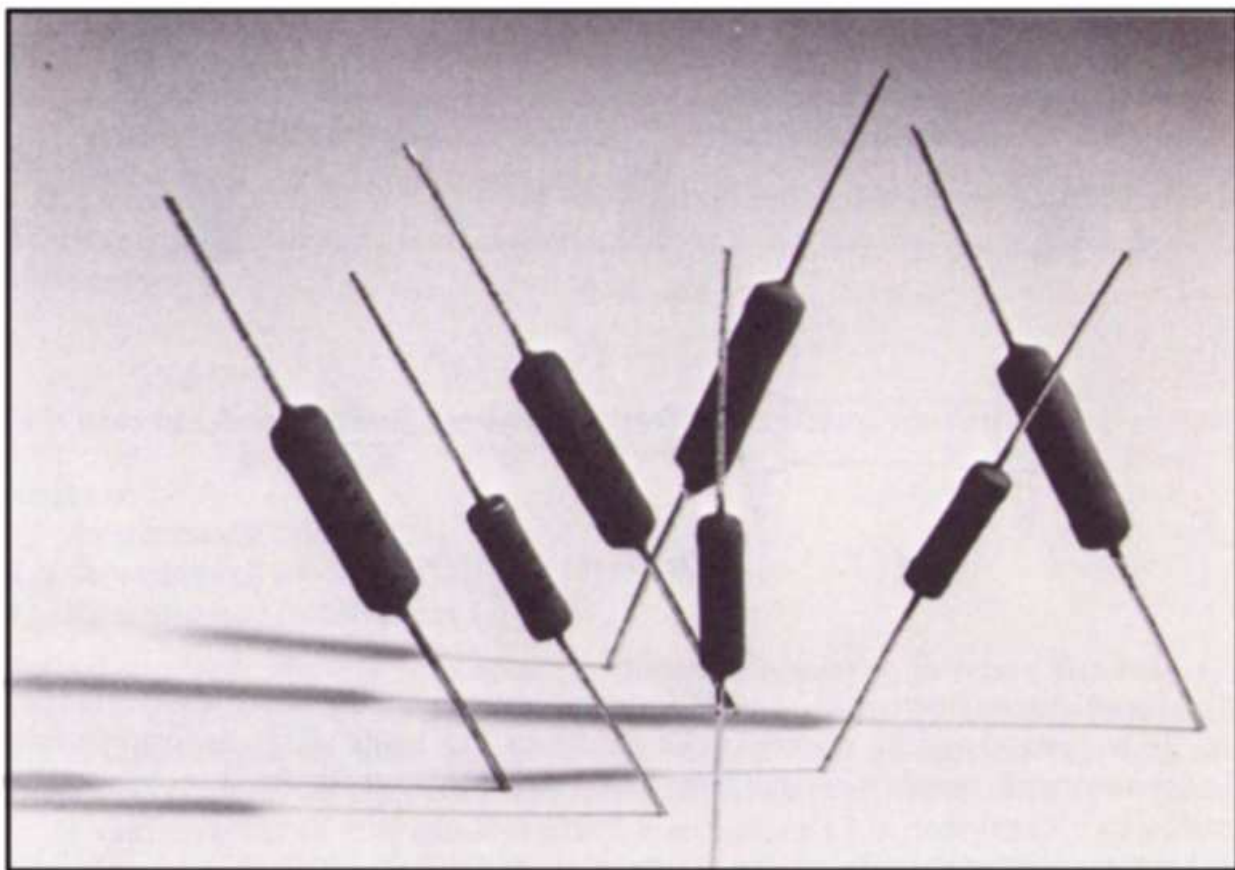


Fig. 3-4

De aansluitdraden worden vervolgens aan deze kapjes gelast. Bij de zwaardere uitvoeringen wordt de weerstandsdraad met klemringen, die tevens zijn voorzien van aansluitlippen, op de drager bevestigd. Een dergelijke uitvoering is afgebeeld in fig. 3-5.

De draad die op de drager van keramiek of glasvezel wordt gewikkeld, is voorzien van een dun laagje oxyde. Het betreffende oxyde gedraagt zich elektrisch als een isolator en vormt zodoende een afscherming tussen de naast elkaar liggende wikkelingen. Belangrijk is verder dat de oxydefilm wel een tamelijk goede warmtegeleider is, mede waardoor een zekere spreiding van de ontwikkelde warmte over de gehele weerstand wordt verkregen. De aldus gefabriceerde weerstand wordt vervolgens bedekt met een laag vuurvast cement (gecementeerde weerstanden), dan wel bedekt met bepaalde laksoorten (geëmailleerde weerstanden). Bij de rechthoekige weerstanden wordt het weerstandslichaam (drager + draad) ondergebracht in een behuizing van keramiek, die verder nog is opgevuld met fijn zand.

Opmerking: Liggen de windingen niet tegen elkaar, dan bevindt zich eveneens isolatiemateriaal (cement of lak) tussen de windingen.



Fig. 3-5



Fig. 3-6

De weerstandswaarde wordt bepaald door een serieschakeling van drie weerstanden, nl. de weerstand van de opgewikkelde draad en aan beide zijden daarvan de overgangsweerstand tussen weerstandsdraad en aansluitdraad. In fig. 3-6 aangegeven met resp. R_{dr} en R .

Bij een goede constructie zijn en blijven laatstgenoemde weerstanden echter klein t.o.v. die van de weerstandsdraad.

De nominale weerstand is dan te berekenen met de bekende formule:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A}$$

Hierin is:

l de lengte van de draad tussen de beide contacten (m);

A de doorsnede van deze draad (mm²);

ρ de specifieke weerstand van het materiaal waaruit de draad bestaat ($\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$);

R de weerstand van de draad tussen beide contacten (Ω).

In de nu volgende tabel is de specifieke weerstand van enkele metalen bij 20 °C in numerieke volgorde vermeld; tevens is daarbij de temperatuurcoëfficiënt (α) aangegeven.

Tabel 3–3

Materiaal	ρ	α
Koper	0,0172	0,0039
Aluminium	0,0262	0,0039
Nikkel	0,0693	0,0043
IJzer	0,10	0,005
Nikkeline	0,40	0,011
Constantaan	0,50	0,00004
Chroomijzer	0,60	0,0016
Chroomnikkel	1,1	0,00011

De temperatuurcoëfficiënt (α) is de weerstandstoename (ΔR) van een weerstand van 1 Ω als deze van 20 °C tot 21 °C in temperatuur stijgt. Als de temperatuur van de weerstand t °C bedraagt, is de weerstandswaarde R_t met de volgende formule te berekenen:

$$R_t = R_{20} \{1 + \alpha (t - 20)\}$$

(α is voor het desbetreffende temperatuurgebied nagenoeg constant).

Hierin is:

R_t de weerstand bij t °C (Ω);

R_{20} de weerstand bij 20 °C (Ω);

α de temperatuurcoëfficiënt ($\frac{1}{^\circ\text{C}}$).

Het zal duidelijk zijn dat voor draadgewonden weerstanden in eerste instantie materiaal in aanmerking komt waarvan de ρ een zo groot mogelijke waarde heeft, terwijl α daarentegen zo klein mogelijk moet zijn. Enkele alliages die veel voor dit doel worden toegepast zijn: chroomnikkel, chroomijzer en constantaan.

In de vakliteratuur en veel catalogi wordt α gepubliceerd in $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ of, zij het niet geheel correct, in ppm . Deze drie letters zijn de afkorting van „parts per million”. Bij chroomnikkel bedraagt α dus 110 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$.

De nominale weerstandswaarde van de draadweerstand die op de markt worden gebracht, varieert gewoonlijk tussen $0,1 \Omega$ en $150 \text{ k}\Omega$, waarbij de tussenliggende waarden weer zijn ondergebracht in de bekende E reeksen.

3.7. Bifilair gewikkelde weerstanden

In feite zijn draadgewonden weerstanden spoelen van weerstandsdraad. Dit betekent dat een dergelijke weerstand een niet te verwaarlozen zelfinductie bezit, iets dat speciaal bij wisselstromen aanleiding kan geven tot ongewenste bijverschijnselen (o.a. vergroting van R tot $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ en een faseverschuiving tussen de spanning over de weerstand en de stroom die als gevolg van deze spanning door de weerstand vloeit). Eigenlijk bestaat een dergelijke weerstand niet alleen uit een serieschakeling van een weerstand en een zelfinductie, doch bezit ook nog een bepaalde, zij het kleine parallelcapaciteit. Voor een draadgewonden weerstand kan zodoende het vervangschema, dat is afgebeeld in fig. 3-7, worden opgesteld.

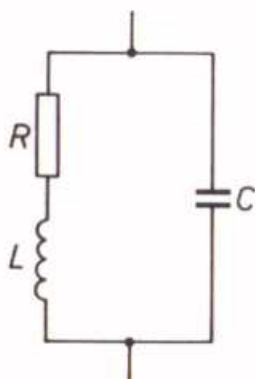


Fig. 3-7

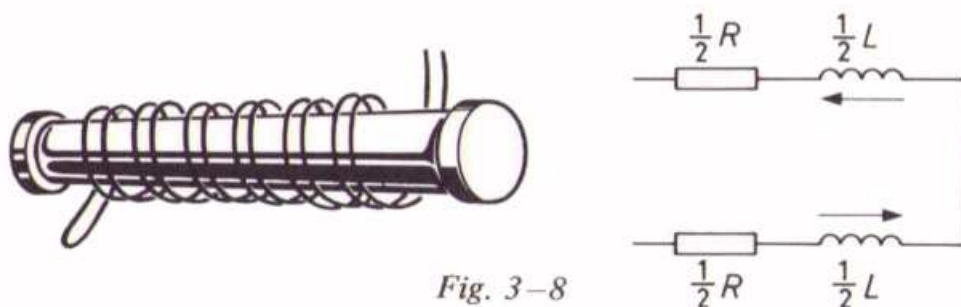


Fig. 3-8

Speciaal voor hoogfrequente wisselstromen kan dit aanleiding geven tot ongewenste nevenverschijnselen, vandaar dat speciale constructies zijn ontwikkeld om de zelfinductie en/of de capaciteit te verkleinen.

In fig. 3-8 is een bifilair gewikkelde draadweerstand afgebeeld. Een dergelijke weerstand wordt gefabriceerd door een dubbelgevouwen weerstandsdraad op een drager van isolatiemateriaal te wikkelen. De invloed van de zelfinductie is nu nagenoeg geheel geëlimineerd. De capaciteit is daarentegen relatief vrij groot.

3.8. Kaartweerstand

Bij deze weerstanden wordt de draad op een dunne plaat (een kaart) van isolatiemateriaal aangebracht. De draadstukken aan de bovenkant van het isolatiemateriaal liggen nu praktisch in één vlak met de draadstukken aan de onderkant van de kaart (zie fig. 3-9). De zelfinductie wordt door deze wikkelmethode tot een minimum gereduceerd.

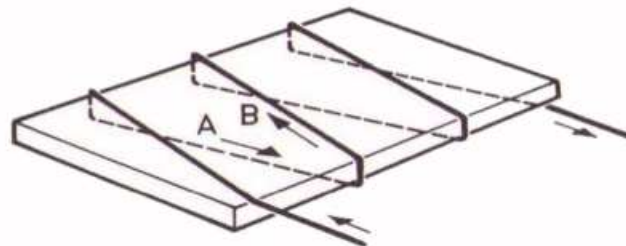


Fig. 3-9

De draadstukken aan de ene zijde van de kaart liggen nl. in het magnetische veld dat wordt teweeggebracht door de stroom, die door de draadeinden aan de andere kant van de kaart vloeit en omgekeerd. Aangezien de stroom door A (zie fig. 3-9) in de tegenovergestelde richting vloeit als die welke door B vloeit en beide stromen even groot zijn, zullen de magnetische velden rondom de draadstukken elkaar nagenoeg volledig opheffen. De capaciteit is minder groot dan die van de bifilaire gewikkelde weerstand.

3.9. Schijfweerstand

In fig. 3-10 is een dergelijke weerstand afgebeeld. Het weerstandslichaam bestaat hier uit dunne spoelen van weerstandsdraad. Door de opeenvolgende spoelen aan te sluiten als afgebeeld in fig. 3-10 wordt het resulterende magnetische veld sterk gereduceerd. Vermeld dient te worden dat de spoeltjes elektrisch volkomen aan elkaar gelijk zijn, ook de wikkelrichting is dezelfde. Het elektrische vervangingschema van een dergelijke weerstand is afgebeeld in fig. 3-11.

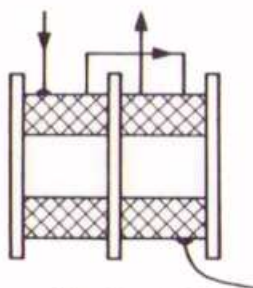


Fig. 3-10

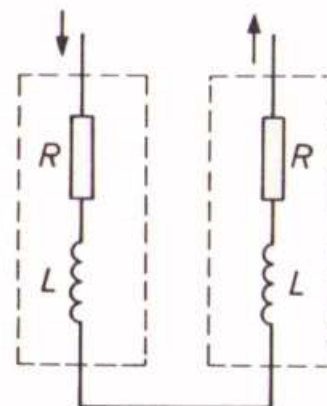


Fig. 3-11

3.10. Instelbare draadweerstand

In bepaalde elektronische schakelingen moet een weerstand eenmalig op een bepaalde waarde worden ingesteld, terwijl tevens de mogelijkheid aanwezig moet zijn om deze waarde later nog te kunnen corrigeren. Voor dit doel worden in het algemeen instelbare draadweerstand gebruikt wanneer het gaat om grotere vermogens. Voor kleine en zeer kleine vermogens komen instelbare weerstanden met bijv. een koolbaan in aanmerking. Dergelijke weerstanden worden echter bij de potentiometers behandeld vanwege hun grote overeenkomst daarmee.

In fig. 3-12 is een instelbare draadweerstand afgebeeld. Over een bepaalde lengte van het weerstandslichaam is een sleuf in de beschermende cement- of laklaag aangebracht, waardoor de weerstandsdraad daar ter plaatse blank is. De weerstand is verder voorzien van een derde elektrische aansluiting, die is uitgevoerd als een klembeugel. Deze elektrode, die tussen de beide vaste aansluitpunten over het weerstandslichaam heen-en-weer kan worden geschoven, wordt na instelling op de gewenste weerstandswaarde, door middel van een schroef op het weerstandslichaam vastgeklemd.

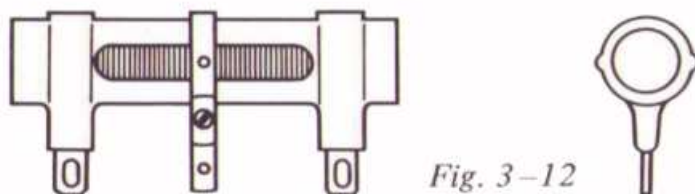


Fig. 3-12

Bij bepaalde uitvoeringen ontbreekt de cement-, dan wel lak- of harsbescherming geheel. Dergelijke weerstanden zijn tamelijk kwetsbaar, zodat het instellen daarvan voorzichtig en met zorg moet worden uitgevoerd. Om de overgangsweerstand tussen beugel en weerstandsdraad zo klein mogelijk te houden, is het contact van de beugel gewoonlijk verzilverd.

Instelbare draadweerstand zijn leverbaar voor vermogens variërend tussen 10 en 250 watt bij 40 °C. De weerstandswaarden liggen in het algemeen tussen 1,2 Ω en 47 kΩ, terwijl de tolerantie ± 5% bedraagt (alleen voor de lage weerstandswaarden is de tolerantie ± 10%).

Het gepubliceerde vermogen (P_n) is alleen van toepassing als de gehele weerstand in de elektronische keten is opgenomen. Is dit niet het geval, dan wordt het maximaal toelaatbare vermogen geringer dan het gepubliceerde vermogen. De nu volgende berekening toont aan dat er een lineair verband bestaat tussen het gedeelte van de weerstand dat in de elektronische keten is opgenomen en het maximaal toelaatbare vermogen. De maximaal toelaatbare stroomsterkte (I_m) in de weerstand volgt uit de relatie:

$$I_m = \sqrt{\frac{P_m}{R}}$$

R = de waarde van de gehele weerstand zonder aftakking.

Is slechts een gedeelte van de weerstand in de keten opgenomen bijv. $R_x \Omega$ dan is het maximaal toelaatbare vermogen

$$P_{m_x} = I_m^2 \cdot R_x$$

Substitutie geeft dan:

$$\begin{aligned} P_{m_x} &= \frac{P_n}{R} \cdot R_x \\ &= \frac{R_x}{R} \cdot P_n \end{aligned}$$

In de schakeling die is afgebeeld in fig. 3-13 mag zodoende slechts de helft van het gepubliceerde vermogen worden toegelaten, aangezien de contactbeugel zich precies in het midden van de weerstand bevindt.

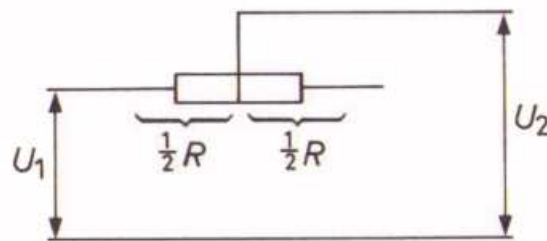


Fig. 3-13

Aangezien de instelbare aansluiting een aantal windingen van de weerstand kortsluit, vermeldt de fabrikant gewoonlijk het verlies aan weerstand dat daardoor ontstaat en drukt dit uit in een percentage van de totale weerstand. Naarmate het vermogen van de instelbare weerstand groter wordt, neemt dit zgn. kortsluitpercentage af omdat de draaddoorsnede bij zwaardere uitvoeringen groter is, zodat minder windingen worden kortgesloten. Het kortsluitpercentage varieert gewoonlijk tussen één en negen procent van de nominale weerstandswaarde. Dit laatste is de waarde zonder de invloed van de klembeugel (het kortsluitpercentage is in dat geval nul procent).

Wanneer een draadgewonden weerstand (vast of instelbaar) moet worden gemonteerd, geschiedt dit vaak op een manier als afgebeeld in fig. 3-14.

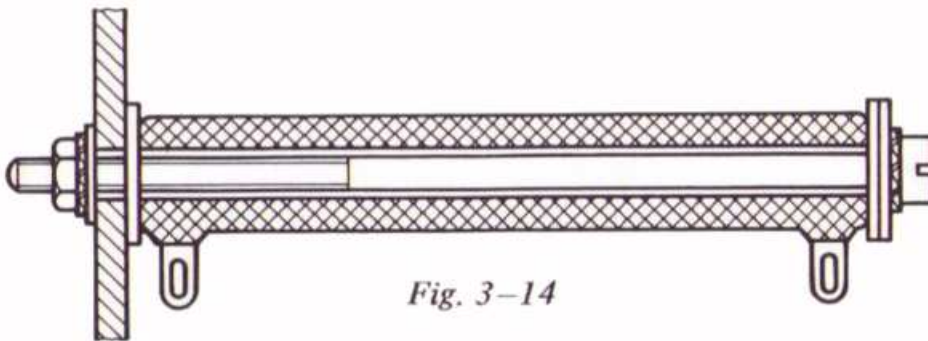


Fig. 3-14

Een dergelijke montage is echter te ontraden als de schroef binnen de weerstand van ijzer is en er een wisselstroom door de weerstand vloeit. In het ijzer vloeien in dat geval wervelstromen, die de weerstand op hun beurt nog eens extra verwarmen. Het directe gevolg is dan ook een beperking van het maximaal toelaatbare vermogen, zoals dat wordt gepubliceerd door de fabrikant.

Ook wanneer er gelijkstroom door de weerstand vloeit, is een dergelijke montage te ontraden wanneer een relatief groot vermogen in de weerstand in warmte wordt omgezet. De reden hiervan is dat de luchtkolom binnen de weerstand aan beide zijden is afgesloten, waardoor een verlies aan koeling door convectorie ontstaat.

3.11. Koolweerstanden

De verschillende soorten koolweerstanden zijn ondergebracht in een tweede groep vaste weerstanden. De elektrische weerstand wordt hier verkregen door materiaal dat geheel dan wel in belangrijke mate uit kooldeeltjes bestaat, vandaar de benaming „koolweerstand”. In fig. 3-15 is een dergelijke weerstand afgebeeld.

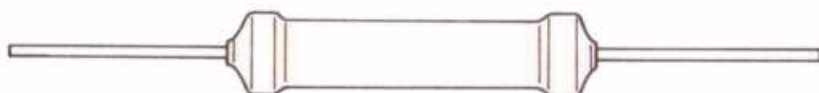


Fig. 3-15

Het weerstandslichaam bestaat veelal uit een staafje of buisje van isolatiemateriaal (glasvezel en keramiek worden veel voor dit doel gebruikt), waarop een laag weerstandsmateriaal (overwegend kooldeeltjes) is aangebracht. Bij een dergelijke constructie bestaat de koolweerstand in wezen uit een holle cilinder van grotendeels kooldeeltjes. De grootte van de weerstand tussen de uiteinden van een dergelijke cilinder is te berekenen met de formule:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{\pi \delta D} \quad (\delta \ll D)$$

Hierin is:

R de weerstand tussen de uiteinden van de cilinder;

D de diameter van de cilinder;

l de lengte van de cilinder;

δ de dikte van de cilinderwand;

ρ de specifieke weerstand van het materiaal waaruit de holle cilinder bestaat.

De lengte en de diameter van het weerstandslichaam, dus de afmetingen, worden in belangrijke mate bepaald door het maximaal toelaatbare vermogen en zijn gestandaardiseerd tot bepaalde groepen. Ter oriëntatie volgen hier enkele getallen.

Max. toel. verm. (W) bij 70 °C	l (mm)	D (mm)
0,33	8,5	2,5
0,50	11	3,7
1,15	19	6,8
2	33	9,3

Een weerstand van $10\ \Omega$ en een weerstand van $1\ \text{M}\Omega$ hebben dus dezelfde afmetingen als het maximaal toelaatbare vermogen van beide gelijk is (bij dezelfde temperatuur, veelal $70\ ^\circ\text{C}$). Dit betekent dat de weerstandswaarde wordt bepaald door:

1. de dikte van de cilinderwand van weerstandsmateriaal (δ),
2. de specifieke weerstand van genoemd weerstandsmateriaal (ρ),
3. de lengte van de cilinder van weerstandsmateriaal (l).

Deze lengte wordt speciaal genoemd omdat zij kunstmatig kan worden vergroot door een spiraalvormige groef in het weerstandsmateriaal te slijpen. In fig. 3-16 is een koolweerstand afgebeeld waarbij in de opgebrachte koollaag een spiraalvormige groef is aangebracht.

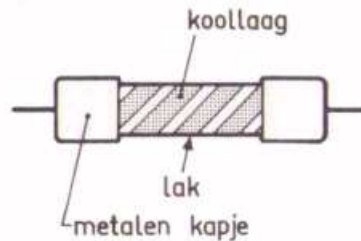


Fig. 3-16

De cilinder van kooldeeltjes is nu veranderd in een lint van kooldeeltjes dat als het ware op de kern van isolatiemateriaal is gewikkeld.

Bij compositiweerstanden is de drager van keramiek of glasvezel bedekt met een laag weerstandsmateriaal, bestaande uit kooldeeltjes met een bindmiddel (er zijn echter ook uitvoeringen waarbij de kooldeeltjes met bindmiddel tot een massief staafje zijn geperst). De weerstandswaarde wordt bij deze weerstanden in eerste instantie bepaald door de keuze van δ en ρ . Laatstgenoemde grootheid is afhankelijk van de korrelgrootte van de kooldeeltjes, de volumedichtheid van deze deeltjes, alsmede hun onderlinge contact. Het zal duidelijk zijn dat het een en ander op veel ervaring berust.

Opgedampte weerstanden (filmweerstand) worden vervaardigd door een staafje van keramiek zeer sterk te verhitten (ca. $1000\ ^\circ\text{C}$) in een omgeving van verdunde lucht. Vervolgens wordt een koolstofhoudend gasmengsel in deze ruimte toegelaten met als gevolg dat het gas ontleedt (pyrolyse), waardoor een laagje zeer zuiver grafiet op het buisje of staafje neerslaat. De weerstandswaarde wordt bij dit fabricageproces dan ook in eerste instantie bepaald door de dikte van de grafietlaag (δ), omdat de specifieke weerstand (ρ) een vrijwel constante waarde heeft. Ook bij deze weerstanden is het gebruikelijk om de weerstandswaarde te vergroten door een spiraalvormige groef in de koollaag te slijpen. Naarmate de spoed van de spiraal kleiner wordt neemt het aantal gangen toe, iets dat resulteert in een stijging van de weerstand.

De aansluitdraden moeten mechanisch stevig aan het aldus gevormde weerstandslichaam worden bevestigd en tevens een goed elektrisch en thermisch contact maken met de koollaag. Bij bepaalde constructies worden daartoe metalen dopjes

over de uiteinden van het weerstandslichaam geklemd, waaraan de vertinde aansluitdraden zijn gelast. Bij andere uitvoeringen worden de aansluitdraden vast om de uiteinden van het weerstandslichaam gewikkeld, terwijl er ook weerstanden in de handel zijn waarbij de aansluitdraden in een buisje van keramisch materiaal (de drager van de koollaag) zijn geperst. In fig. 3-17 is een doorsnede van een dergelijke weerstand afgebeeld. Opgemerkt zij nog dat bij de laatste constructie het geheel is omgeven door een mantel van kunststof, veelal phenol hars.

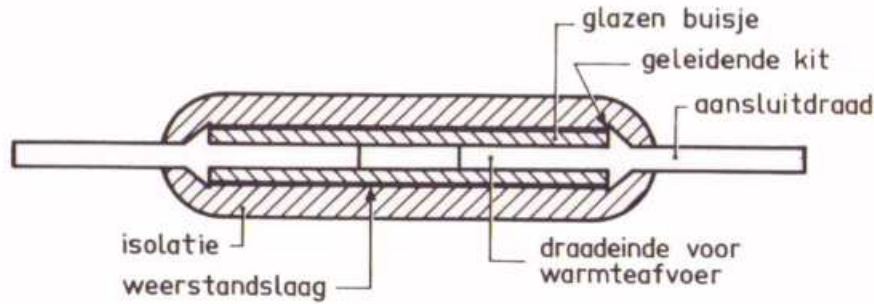


Fig. 3-17

Na fabricage wordt de weerstand bedekt met enkele lagen beschermende lak om te voorkomen dat de hygroscopische koollaag mechanisch wordt beschadigd, dan wel vocht opneemt. In het laatste geval wordt de weerstandswaarde in sterke mate beïnvloed en zal als regel kleiner worden.

3.12. De kritische weerstandswaarde

Tussen het maximaal toelaatbare vermogen (P) van een weerstand, de weerstandswaarde (R) en de spanning over de weerstand (U) bestaat de relatie:

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

Het maximaal toelaatbare vermogen wordt door een aantal factoren bepaald, die in het voorgaande uitvoerig zijn behandeld. De grootte van de maximaal toelaatbare spanning over de weerstand is afhankelijk van de volgende factoren:

- 1 – de afmetingen van het weerstandslichaam en de breedte van de ingeslepen groef;
- 2 – de isolatie van de weerstand.

Genoemde spanning wordt vermeld door de fabrikant.

Van een 1 W koolweerstand wordt bijv. als maximaal toelaatbare spanning een waarde van 500 V opgegeven. Dit betekent dat:

$$\begin{aligned} 500 &= \sqrt{1 \cdot R} \\ \text{of} \\ R &= 250\,000 \, \Omega \end{aligned}$$

Deze weerstandswaarde wordt aangeduid als de kritische weerstand, omdat bij hogere weerstandswaarden het maximaal toelaatbare vermogen daalt, aangezien de spanning $U = 500 \text{ V}$ niet mag worden overschreden uit oogpunt van veiligheid en betrouwbaarheid. Zo bedraagt voor een weerstand van $1 \text{ M}\Omega$ het maximaal toelaatbare vermogen niet 1 W , doch slechts $\frac{1}{4} \text{ W}$ als $U = 500 \text{ V}$.

Uit dit voorbeeld volgt dat de kritische weerstandswaarde alleen ter sprake komt bij grote en zeer grote weerstandswaarden.

3.13. Het ruisen van koolweerstand

Als door een koolweerstand een gelijkstroom vloeit, ontstaat over die weerstand een gelijkspanning waarvan de grootte kan worden berekend met de wet van Ohm. Het verloop van genoemde spanning als functie van de tijd ziet er dan uit als afgebeeld in fig. 3-18. Een nadere beschouwing leert echter dat het verloop (sterk vergroot) er uitziet als afgebeeld in fig. 3-19.

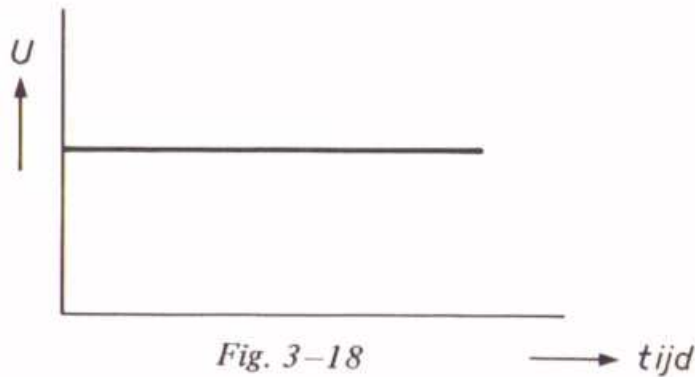


Fig. 3-18

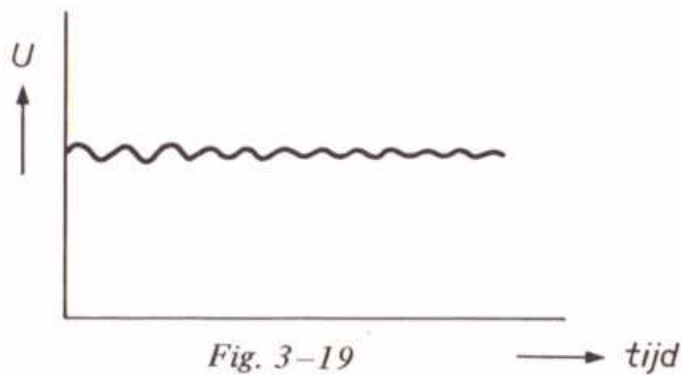


Fig. 3-19

Dit betekent dat op de gelijkspanning een ongewenste wisselspanning (stoorspanning) is gesuperponeerd. Deze spanning wordt door de weerstand zelf in de stroomketen geïntroduceerd. Wordt genoemde stoorspanning versterkt en hoorbaar gemaakt, dan wordt een geruis waargenomen. De betreffende wisselspanning wordt daarom aangeduid als de ruisspanning. Bij nadere beschouwing blijkt dat deze ruisspanning gelijk is aan de som van twee spanningen

- de thermische ruisspanning
- de stroomruispanning.

Thermische ruis, veelal ook aangeduid als witte ruis, wordt veroorzaakt door de thermische beweging van de moleculen waaruit de weerstand is opgebouwd. Genoemd vibreren wordt heviger naarmate de temperatuur van het materiaal stijgt. In de weerstand bevindt zich als het ware een energiebron, die een bepaalde hoeveelheid ruisenergie levert. De grootte van deze energie is te berekenen met de formule:

$$P_r = 4 k \cdot T \cdot B$$

Hierin is:

P_r de grootte van de ruisenergie (J);
 k de constante van Boltzmann (J/°C) ($1,38 \cdot 10^{-23}$);
 T de absolute temperatuur (°K);
 B de bandbreedte die wordt beschouwd (Hz).

Onder de thermische ruisspanning (U_r) wordt een denkbeeldige spanning verstaan, die over de weerstand aanwezig is en waarvan de grootte gelijk is, aan:

$$U_r = \sqrt{P_r \cdot R}$$

R = de weerstandswaarde

Substitutie geeft:

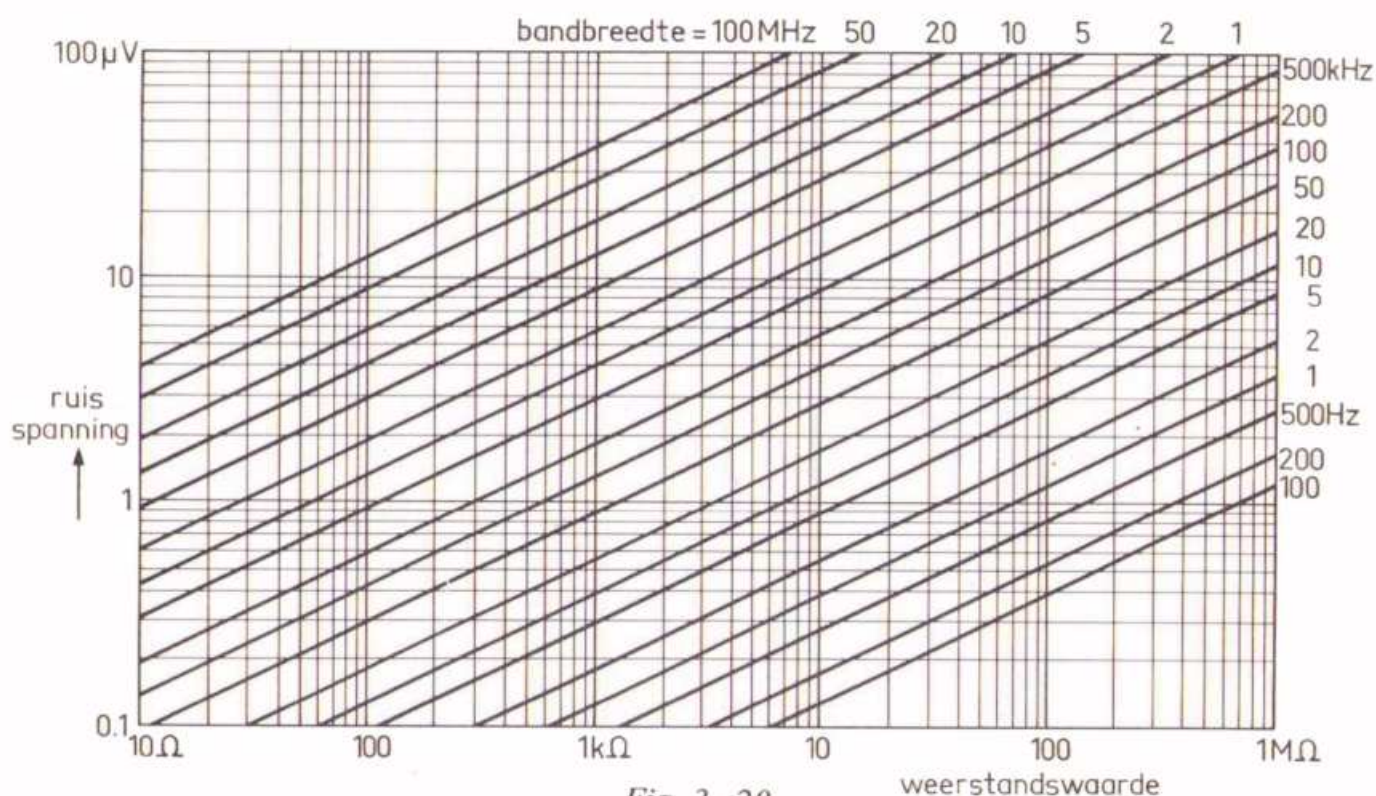
$$U_r^2 = 4k \cdot T \cdot B \cdot R$$

$$U_r = 2 \sqrt{k \cdot T \cdot B \cdot R}$$

Bij wijze van voorbeeld wordt nu de thermische ruisspanning van een weerstand van 10 kΩ berekend. Vermeld zij nog dat de temperatuur van de weerstand 20 °C is en de beschouwde bandbreedte 10 MHz.

$$\begin{aligned} U_r &= 2 \sqrt{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (20+273) \cdot 10^7 \cdot 10^4} \\ &= 2 \sqrt{400 \cdot 10^{-12}} \\ &= 40 \mu V \end{aligned}$$

In fig. 3-20 is een grafiek afgebeeld, die het verband aangeeft tussen de weerstandswaarde, de bandbreedte en de ruisspanning. De temperatuur bedraagt daarbij 20 °C. Uit de grafiek volgt dat de ruisspanning over een weerstand van 1 kΩ gelijk is aan 9 μV als de beschouwde bandbreedte 5 MHz is.



Stroomruis wordt in belangrijke mate bepaald door de sterkte van de stroom die door de weerstand vloeit. Aangezien echter de spanning over de weerstand recht-evenredig is met de stroom die door de weerstand vloeit, wordt de stroomruis gewoonlijk opgegeven in $\mu\text{V}/\text{V}$. Dit is dan de verhouding tussen de stroomruis-spanning in μV en de gelijkspanning waarop deze ruisspanning betrekking heeft. In fig. 3-21 is een grafiek afgebeeld, die het verband aangeeft tussen de weerstandswaarde en de stroomruisspanning in $\mu\text{V}/\text{V}$ bij een compositieweerstand.

Uit deze grafiek blijkt dat voor een weerstand van $10\text{ k}\Omega$ de verhouding ruisspanning/gelijkspanning gelijk is aan $4\text{ }\mu\text{V}/\text{V}$. Dit betekent dat wanneer de gelijkspanning over de weerstand 10 V bedraagt, er over deze weerstand een ruisspanning van $40\text{ }\mu\text{V}$ aanwezig is als gevolg van de stroom die door de weerstand vloeit.

De totale ruisspanning over de weerstand is te berekenen met de formule:

$$U_{tot} = \sqrt{U_r^2 + U_{str}^2}$$

Hierin is:

- U_{tot} de totale ruisspanning (μV);
- U_r de thermische ruisspanning (μV);
- U_{str} de stroomruisspanning (μV).

Bij koolweerstand en in het bijzonder bij compositieweerstanden domineert de stroomruis.

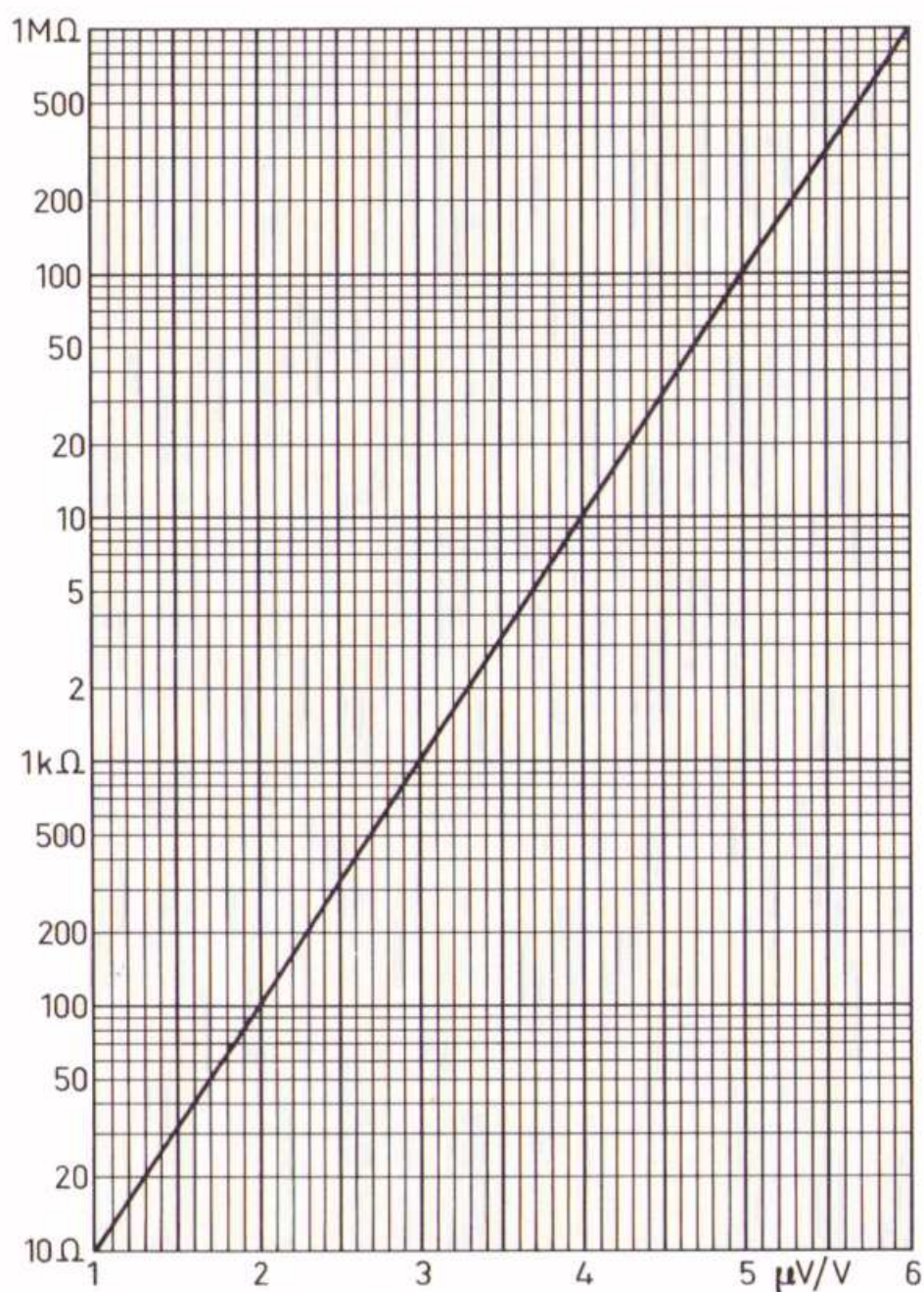


Fig. 3-21

3.14. Stabiliteit

De stabiliteit van een weerstand (S) wordt gedefinieerd als het weerstandsverloop (ΔR) per eenheid van weerstand na een bepaald tijdsbestek; meestal is dit 1000 uur.

In de vorm van een formule

$$S = \frac{\Delta R}{R} \text{ (na 1000 uur)}$$

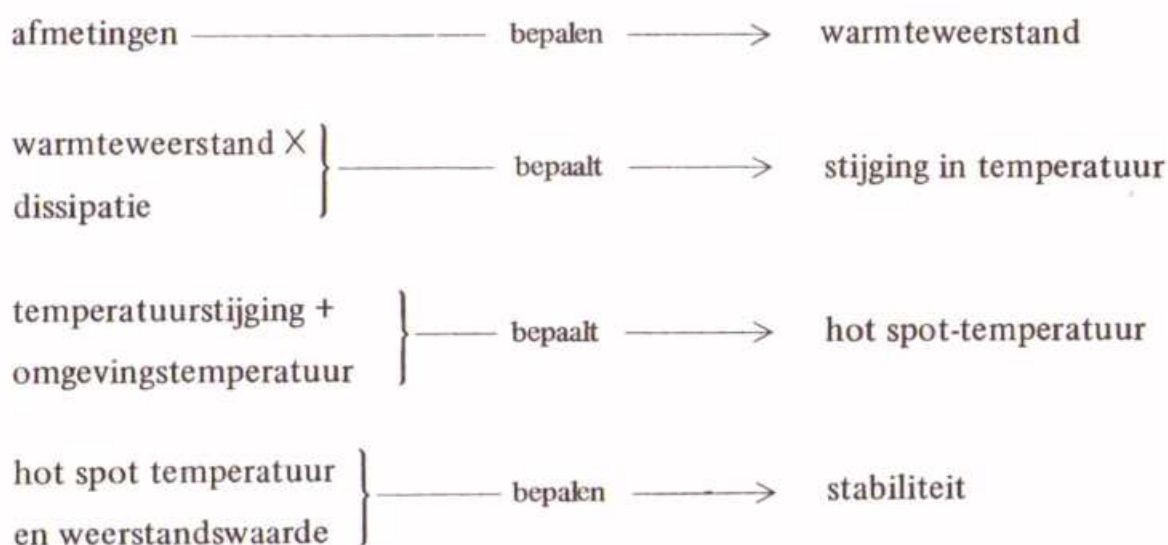
Bij langere of kortere tijdsduur kan de stabiliteit bij benadering worden bepaald

door de vermelde waarde (na 1000 bedrijfsuren) te vermenigvuldigen met, resp. te delen door:

$$\sqrt{\frac{\text{tijdsduur}}{1000}}$$

Onderzoekingen leren dat de stabiliteit van een koolweerstand in hoofdzaak wordt bepaald door de hot spot-temperatuur en de weerstandswaarde. De stabiliteit is daarbij omgekeerd evenredig met de weerstandswaarde, indien de hot spot-temperatuur niet verandert. Een hogere weerstandswaarde geeft een geringere stabiliteit omdat de koollaag dan dunner is.

Het bovenstaande kan als volgt worden samengevat:



Hierbij dient nog te worden opgemerkt dat de maximaal toelaatbare waarde van de hot spot-temperatuur gewoonlijk 155 °C bedraagt, terwijl het nominale vermogen van de weerstand meestal wordt gepubliceerd bij een omgevingstemperatuur van 70 °C.

In fig. 3—22 is een nomogram afgebeeld dat voor een bepaald type koolweerstand de relatie weergeeft tussen de stabiliteit ($\frac{\Delta R}{R}$), de weerstandswaarde (R), de omgevingstemperatuur (T_{omg}) en het maximaal toelaatbare vermogen (P).

Voorbeeld: Gegeven een koolweerstand van 100 Ω . Geëist wordt dat de stabiliteit 0,5% bedraagt. Dit laatste betekent dat het maximaal toelaatbare weerstandsverloop na 1000 uren niet groter mag zijn dan 0,5 Ω . Uit fig. 3—22 volgt dat als hot-spot temperatuur (T_m) voor deze weerstand maximaal 112 °C (punt c op de T_m -as) mag worden toegelaten. Bedraagt de omgevingstemperatuur 70 °C, dan betekent dit dat maximaal een vermogen van $P = 0,25$ watt in warmte mag worden omgezet (punt e op de P as) om aan de gestelde eisen te kunnen voldoen.

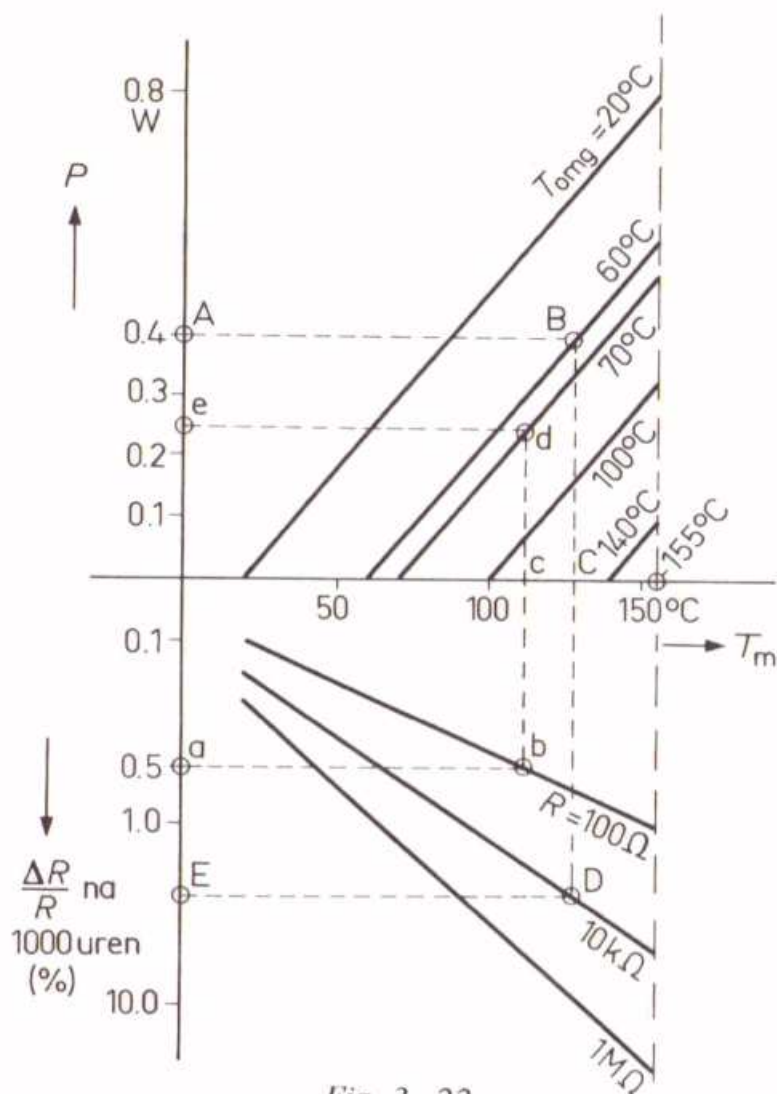


Fig. 3-22

Algemene opmerkingen

Koolweerstanden zijn in de handel verkrijgbaar voor vermogens van 0,05; 0,1; 0,125; 0,25; 0,5; 1 en 2 W (bij 70°C) en in bepaalde uitvoeringen voor nog grotere vermogens.

De weerstandswaarden (gewoonlijk ondergebracht in de E12- of E24-reeks) variëren veelal tussen 10Ω en $22\text{ M}\Omega$. Bij bepaalde uitvoeringen is het weerstandsbereik nog doorgetrokken tot $100\text{ M}\Omega$.

De maximaal toelaatbare spanning voor bovengenoemde weerstanden bedraagt achtereenvolgens: 50 V; 150 V; 250 V; 350 V; 500 V; 750 V en 1000 V voor de reeds eerder vermelde vermogens.

Ze worden in de meest uiteenlopende schakelingen gebruikt, vandaar dat het toepassingsgebied zich uitstrekt van hoorapparaten tot computers en van de grootste telecommunicatie-installatie tot draagbare radio-ontvangers. Opgemerkt zij echter dat in schakelingen, waar eisen worden gesteld aan stabiliteit en ruis, de voorkeur moet worden gegeven aan opgedampte weerstanden.

De temperatuurcoëfficiënt van koolweerstanden is negatief en bedraagt zo rond de

$-300 \cdot 10^{-6}/\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$. Dit geldt niet voor weerstandswaarden $< 10 \Omega$, omdat het weerstandslichaam dan niet uit een koollaag doch uit een nikkellaag bestaat, ofschoon deze weerstanden wel als koolweerstanden worden aangeduid. De temperatuurcoëfficiënt van laatstgenoemde weerstanden is positief en bedraagt $200 \cdot 10^{-6}/\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$.

3.15. Metaalfilmweerstanden

Deze weerstanden bestaan uit een staafje of buisje van hoogwaardig keramisch materiaal waarop een uiterst dunne laag metaal is aangebracht. Ze worden gefabriceerd door één of meer metalen (veelal alliages van nikkel, chroom en aluminium) in vacuüm te verdampen en deze damp door verstuiving op genoemd staafje aan te brengen. Op de drager ontstaat zodoende een homogeen laagje metaal, waarvan de dikte wordt bepaald door het fabricageproces (dampdichtheid, tijdsduur, temperatuur, etc.). In de op deze wijze verkregen metaalfilm wordt als regel nog een spiraalvormige groef geslepen om de vereiste weerstandswaarde te verkrijgen. Nadat de aldus verkregen weerstand is voorzien van metalen kapjes waaraan de aansluitdraden zijn gelast, wordt het geheel bedekt met enkele lagen speciale lak om de metaalfilm te beschermen tegen mechanische beschadiging en de invloed van vocht.

Metaalfilmweerstanden zijn in eerste instantie bedoeld om te worden verwerkt in professionele apparatuur, waarbij hoge eisen worden gesteld aan de stabiliteit, betrouwbaarheid, tolerantie en ruis. Toepassing o.a. in computers, telecommunicatie-apparatuur en meetinstrumenten. Er zijn echter ook reeds toepassingen in de zgn. toonbankapparatuur.

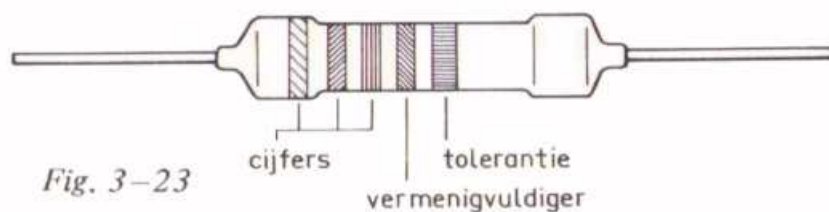
De weerstandswaarde en tolerantie van metaalfilmweerstanden worden evenals bij de koolweerstanden aangegeven door gekleurde ringen dan wel een cijfer/lettercode. Aangezien het hier veelal gaat om precisieweerstanden, zijn de weerstandswaarden uitgebreid tot de E96- en soms tot de E192-reeks.

3.16. Kleurcodering

Bij deze weerstanden is de waardering van de verschillende kleuren dezelfde als bij de koolweerstanden, zodat hiervoor wordt verwezen naar blz. 42.

De volgorde van de ringen is eveneens dezelfde als bij de koolweerstanden. Er zijn echter wel vijf ringen nodig om de weerstandswaarde en toelaatbare tolerantie aan te duiden indien de waarde behoort tot de E96 of E192 reeks (zie ook fig. 3-23). Een weerstand van $22,1 \text{ k}\Omega$ (E96-reeks) met een tolerantie van $\pm 1\%$ wordt dan aangeduid door de volgende gekleurde ringen: rood/rood/bruin/rood/bruin.

In de cijfer/letter-code wordt deze waarde en tolerantie aangegeven door 22K1F.



3.17. Potentiometers (regelbare weerstanden)

Potentiometers zijn weerstanden waarvan de weerstandswaarde continu regelbaar is tussen een minimum en een maximum. Afhankelijk van de constructie kan direct een onderverdeling worden gemaakt in draadgewonden potentiometers en koolbaanpotentiometers. In het algemeen kan worden gesteld dat voor vermogens groter dan 0,5 W (bij 40 °C) uitsluitend draadgewonden potentiometers in aanmerking komen.

3.17.1. Draadgewonden potentiometers

Bij deze potentiometers bestaat de eigenlijke weerstand uit een ring van isolatiemateriaal (veelal keramiek of hardpapier), waarop een laag weerstandsdraad is gewikkeld. Over genoemde wikkeling beweegt zich een glijcontact, waarmee de vereiste weerstandswaarde kan worden ingesteld. Bij de draaipotentiometers verplaatst het contact zich evenredig met de hoekverdraaiing van de aandrijfas.

Bij constructies voor kleinere vermogens is deze as veelal van kunststof (gewoonlijk van nylon), terwijl voor de zwaardere uitvoeringen stalen assen worden toegepast. Stalen assen worden ook verwerkt in potentiometers voor kleinere vermogens wanneer een hoge graad van precisie wordt geëist.

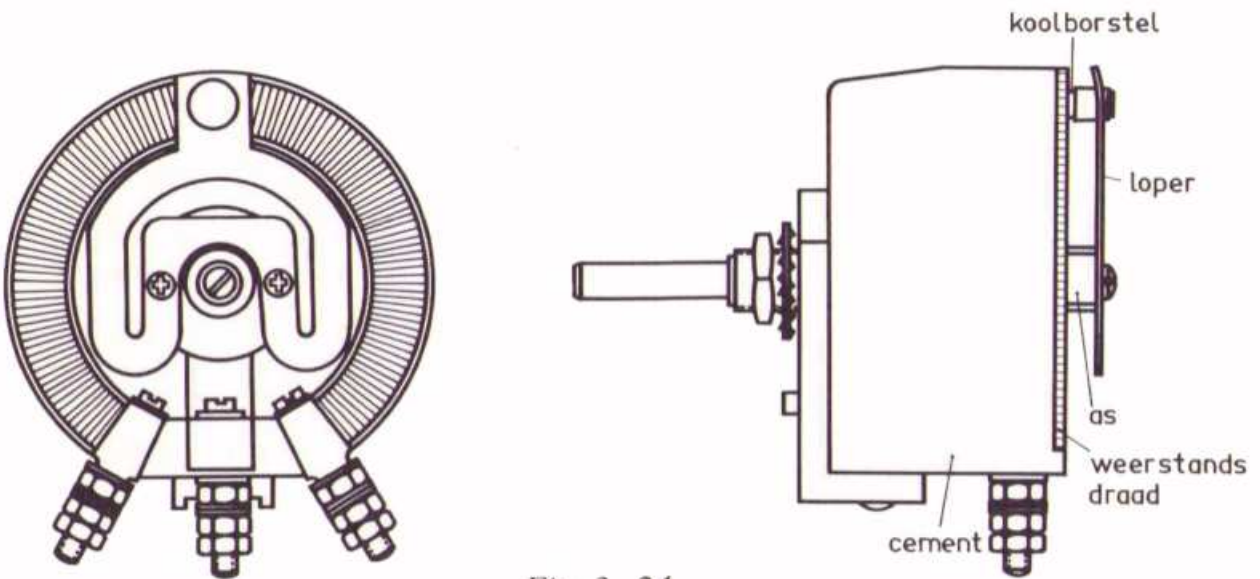


Fig. 3-24

Bij potentiometers voor grotere vermogens (groter dan 10 W) is een laag weerstandsdraad op een ring van keramisch materiaal gewikkeld. Het geheel is, met uitzondering van de kant waar zich het glijcontact bevindt, bedekt met vuurvast cement. Dit cement is aangebracht om:

1. de wikkeling te beschermen tegen mechanische beschadiging,
2. een solide constructie te verkrijgen,
3. een gelijkmatige warmteverdeling te bevorderen.

Bij deze potentiometers ontbreekt veelal de beschermende behuizing om een effectieve koeling te verkrijgen (bevorderen van de koeling door convectie).

De stroomafname vindt plaats via een koolborstel die in het glijcontact, meestal aangeduid als de looper, is aangebracht. De koolborstel wordt daarbij krachtig tegen de eigenlijke draadweerstand gedrukt. Bij verdraaiing van de as verschuift de koolborstel over de wikkeling van weerstandsdraad. In fig. 3-24 is een dergelijke potentiometer afgebeeld.

Tussen de hoekverdraaiing van de as en de weerstandsverandering die daarvan een gevolg is, bestaat een lineair verband. Deze potentiometers zijn leverbaar tot waarden van ongeveer $10\text{ k}\Omega$, tolerantie $\pm 10\%$. Het maximaal toelaatbare vermogen dat in belangrijke mate de afmetingen van de potentiometer bepaalt, varieert bij veel fabrikaten tussen de 10 en de 100 W.

In elektronische apparatuur worden hoofdzakelijk draadgewonden weerstanden met een kleiner vermogen (maximaal ongeveer 1 W bij 70°C) verwerkt. De eigenlijke weerstand is bij deze potentiometers ondergebracht in een stofdichte behuizing van kunststof, die ook geschikt is voor paneelmontage. Opgemerkt zij nog dat er ook uitvoeringen op de markt worden gebracht die speciaal zijn geconstrueerd voor montage op panelen met een gedrukte bedrading.

De instelpotentiometers, die o.a. worden toegepast in KTV ontvangers voor het instellen van de horizontale en verticale convergentie, vormen een speciaal soort draadgewonden potentiometers. In fig. 3-25 is een dergelijke instelpotentiometer afgebeeld. De vereiste weerstandswaarde wordt bij de afgebeelde uitvoering ingesteld met een schroevendraaier.

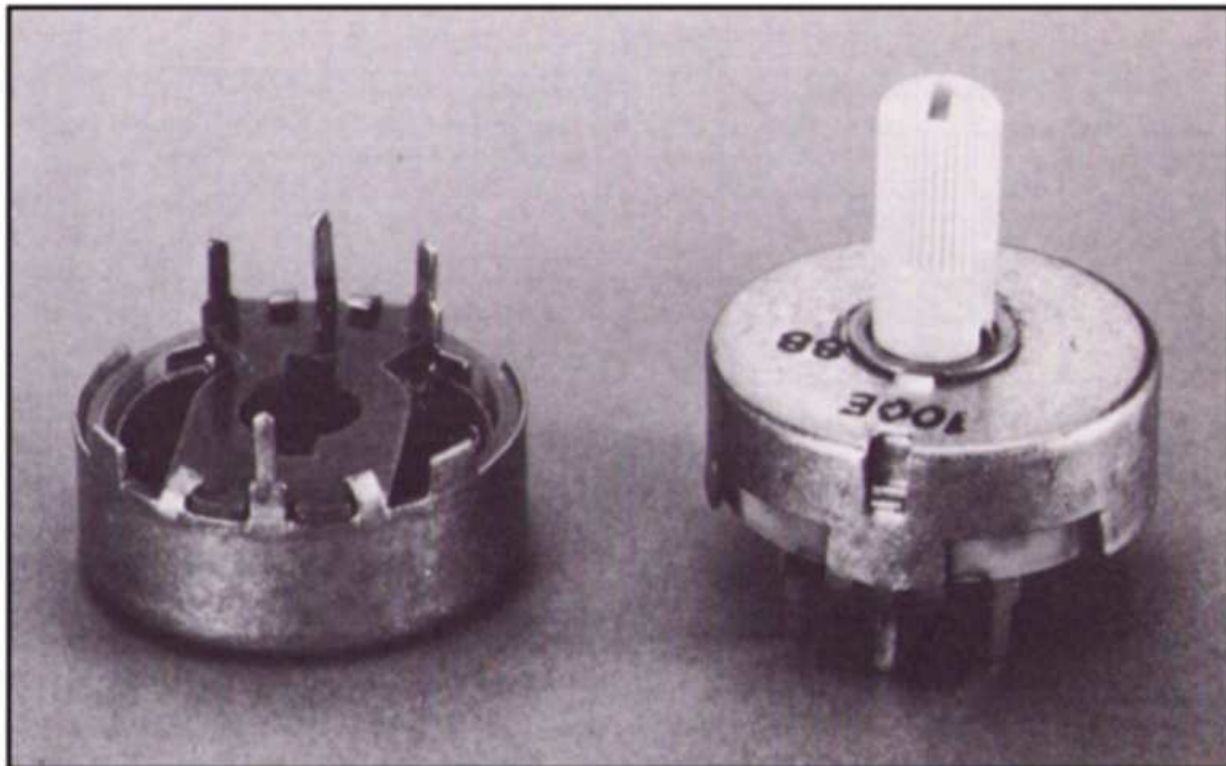


Fig. 3-25

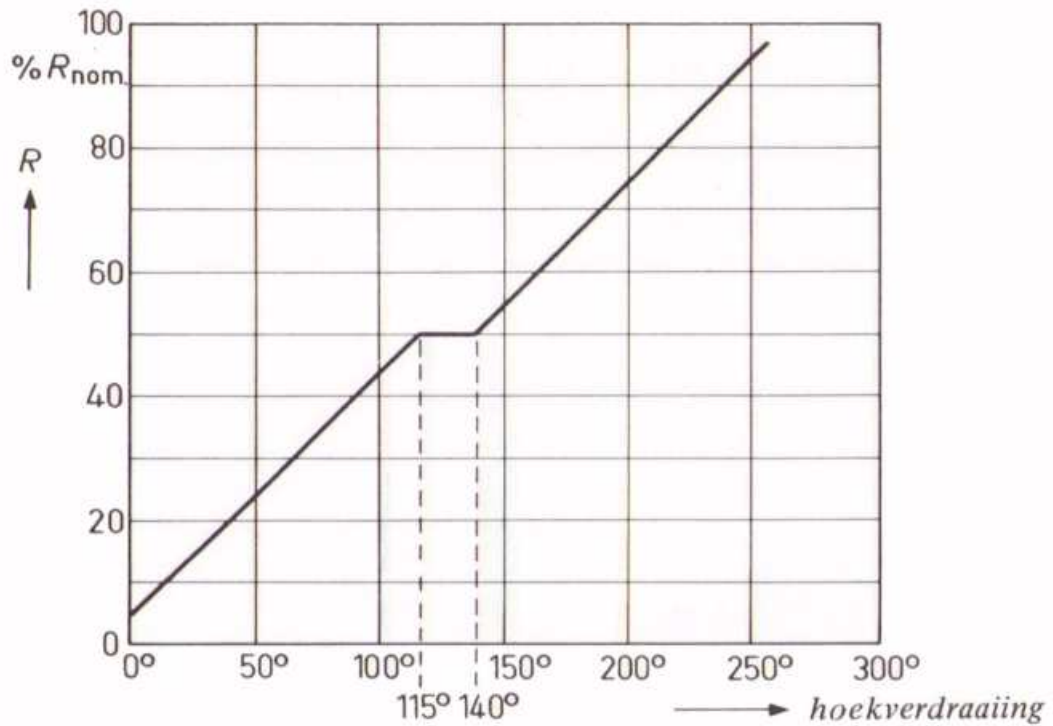
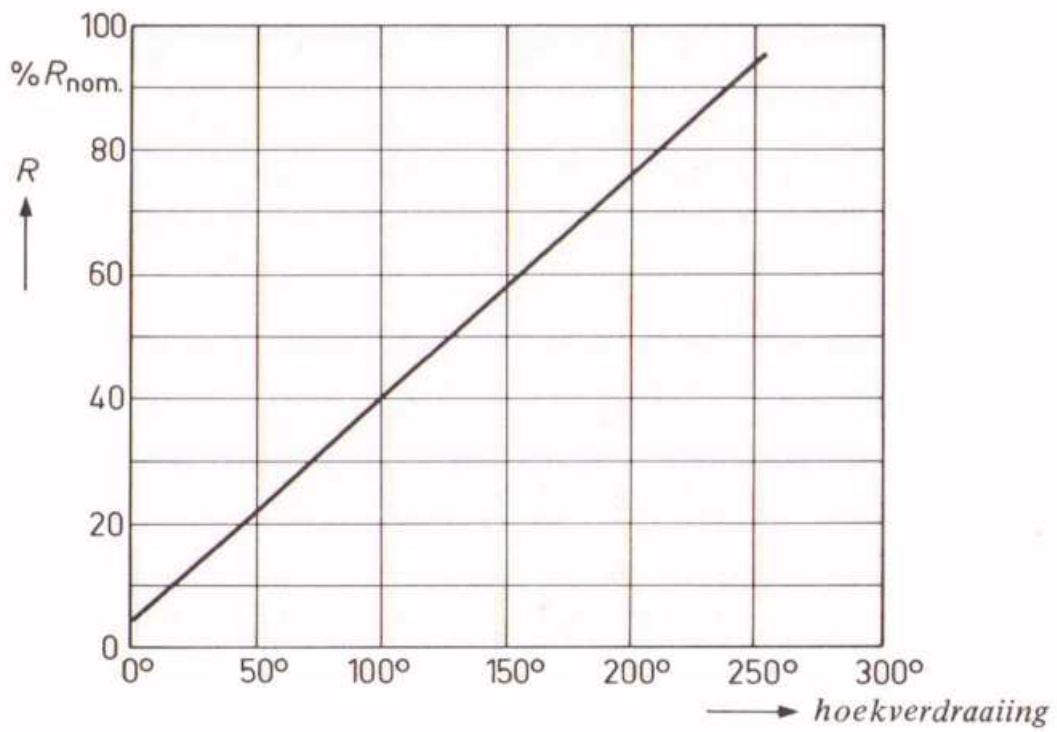


Fig. 3-26

In fig. 3-26 zijn twee grafieken afgebeeld, die beide het verband aangeven tussen de hoekverdraaiing van de looper en het percentage van de nominale weerstandswaarde dat daarmee overeenkomt. Uit deze grafieken volgt direct het reeds eerder vermelde lineaire verband tussen de hoekverdraaiing en de weerstandswaarde. De rechter grafiek heeft betrekking op een potentiometer met een vaste aftakking op de wikkeling. Het horizontale verloop in het midden van de grafiek ontstaat doordat enkele windingen worden kortgesloten door de betreffende aansluiting. Verder

leert de grafiek dat een potentiometer altijd een bepaalde minimum weerstand bezit. Voor de potentiometer waarop de grafiek betrekking heeft bedraagt deze minimum weerstand ongeveer 5% van de nominale waarde.

3.17.2. Koolbaanpotentiometers

Deze potentiometers worden in grote verscheidenheid op de markt gebracht. De meest voorkomende uitvoering is daarbij die, waarbij op een niet geheel gesloten cirkelvormige drager van isolatiemateriaal (veelal hardpapier) een laag kooldeeltjes met een bindmiddel is aangebracht. De beide uiteinden van de koollaag zijn elk verbonden met een aansluiting op de behuizing van de potentiometer, terwijl de derde aansluiting is doorverbonden met de looper, die verend tegen de gepolijste koollaag drukt. De geheel gesloten behuizing is van metaal, kunststof of een combinatie van beide en heeft een tweeledige functie:

1. voorkomen dat looper en/of koolbaan mechanisch worden beschadigd,
2. voorkomen dat het geheel vervuult, met als gevolg dat de overgangsweerstand tussen koollaag en looper groter wordt.

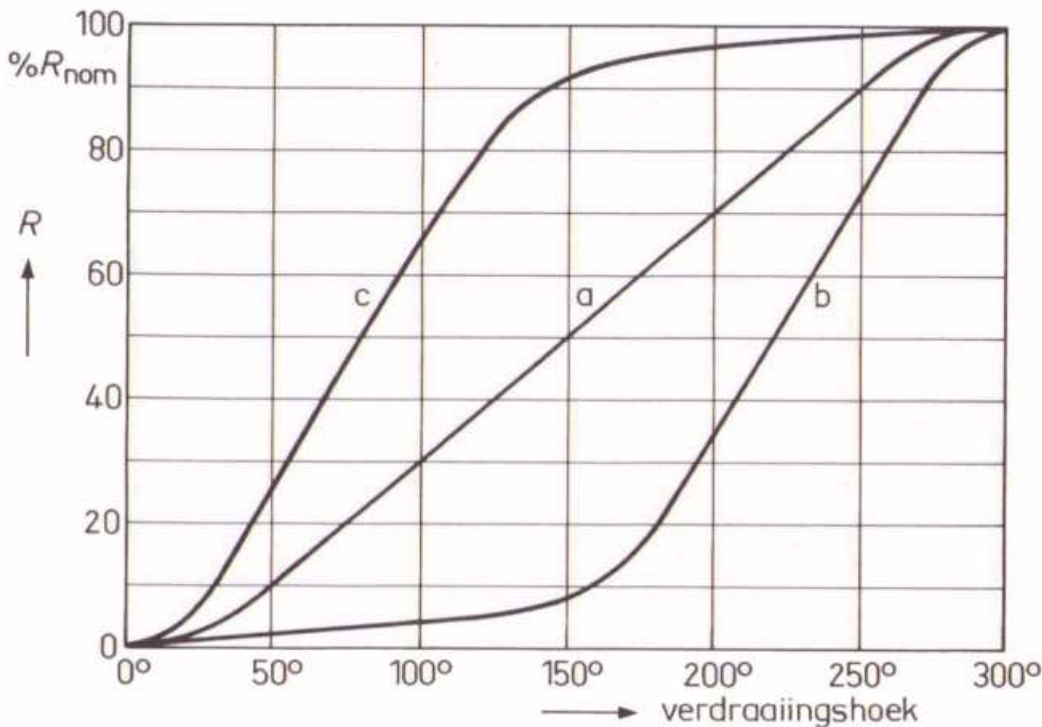


Fig. 3-27

Het weerstandsverloop als functie van de hoekverdraaiing van de looper kan lineair, logaritmisch of anti-logaritmisch zijn (resp. a, b en c in fig. 3-27). Het maximaal toelaatbare vermogen bij de logaritmische en de anti-logaritmische potentiometers is gewoonlijk de helft van dat van de lineaire potentiometers (uiteraard bij dezelfde omgevingstemperatuur). Veelal bedragen deze vermogens $\frac{1}{4}$ W voor de lineaire potentiometers en $\frac{1}{8}$ W voor de andere soorten.

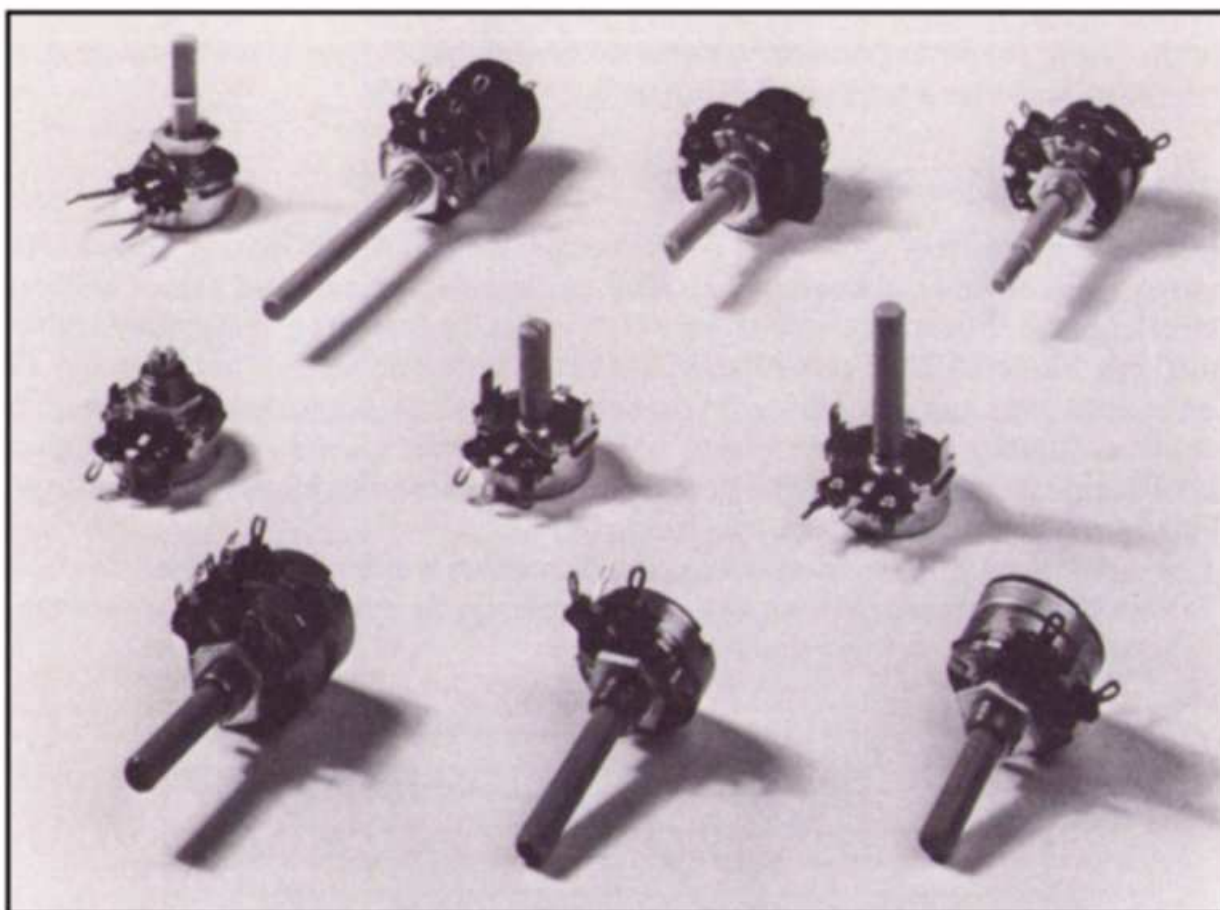


Fig. 3-28

Het weerstandsbereik varieert voor de logaritmische potentiometers gewoonlijk van $300\ \Omega$ tot enkele $M\Omega$'s en voor de lineaire potentiometers van $220\ \Omega$ tot $4,7\ M\Omega$. Aangezien een potentiometer in de meeste gevallen is geconstrueerd voor paneelmontage, ligt het voor de hand dat er veel uitvoeringen zijn waarbij de potentiometer wordt gecombineerd met een schakelaar, omdat zodoende plaats en extra materiaal worden bespaard. Er zijn uitvoeringen met een enkelpolige en met een dubbelpolige schakelaar, werkend volgens het trek/druk- dan wel het roterend principe.

In fig. 3-28 zijn enkele uitvoeringen van koolbaanpotentiometers afgebeeld.

3.17.3. Tandempotentiometers

Tandempotentiometers zijn samengesteld uit twee enkelvoudige potentiometers die op één as zijn gemonteerd en beide een volkomen gelijkloop hebben. Het verband tussen hoekverdraaiing en weerstandsverandering is voor beide potentiometers dan ook volkomen gelijk. In fig. 3-29 is een tandempotentiometer met dubbelpolige schakelaar afgebeeld.

Het voornaamste toepassingsgebied wordt gevormd door apparatuur voor stereofonische geluidsweergave, waarbij o.a. de geluidsstrekte van beide kanalen in volkomen gelijkloop moet kunnen worden geregeld.

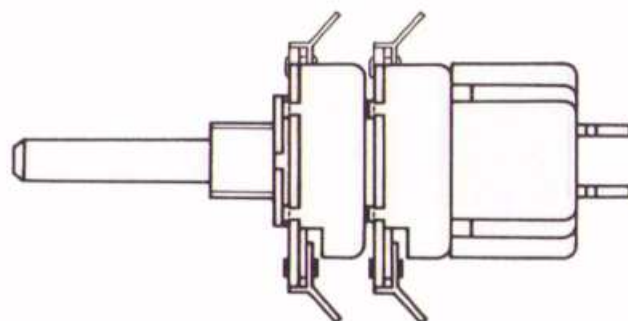


Fig. 3-29

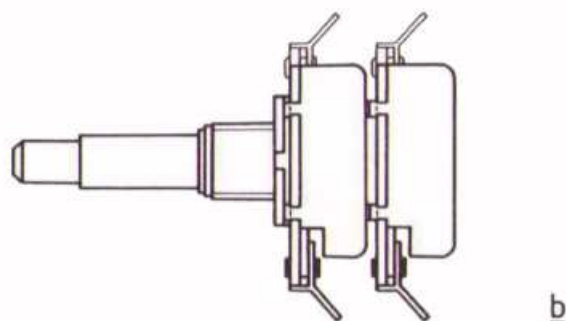
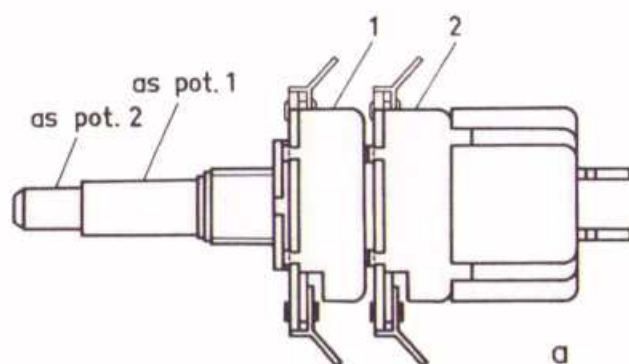


Fig. 3-30

3.17.4. Twinpotentiometers

Deze potentiometers bestaan uit twee afzonderlijke potentiometers die zijn samen-
gebouwd, beide zullen in het algemeen totaal verschillend zijn.

De as van de ene potentiometer is van staal, die van de andere is uitgevoerd als een
holle buis van plastic die over de metalen as is geschoven. Beide potentiometers
kunnen zodoende onafhankelijk van elkaar worden bediend. In fig. 3-30 is een
dergelijke potentiometer afgebeeld. Bij bepaalde uitvoeringen is één van de twee
potentiometers nog extra voorzien van een schakelaar.

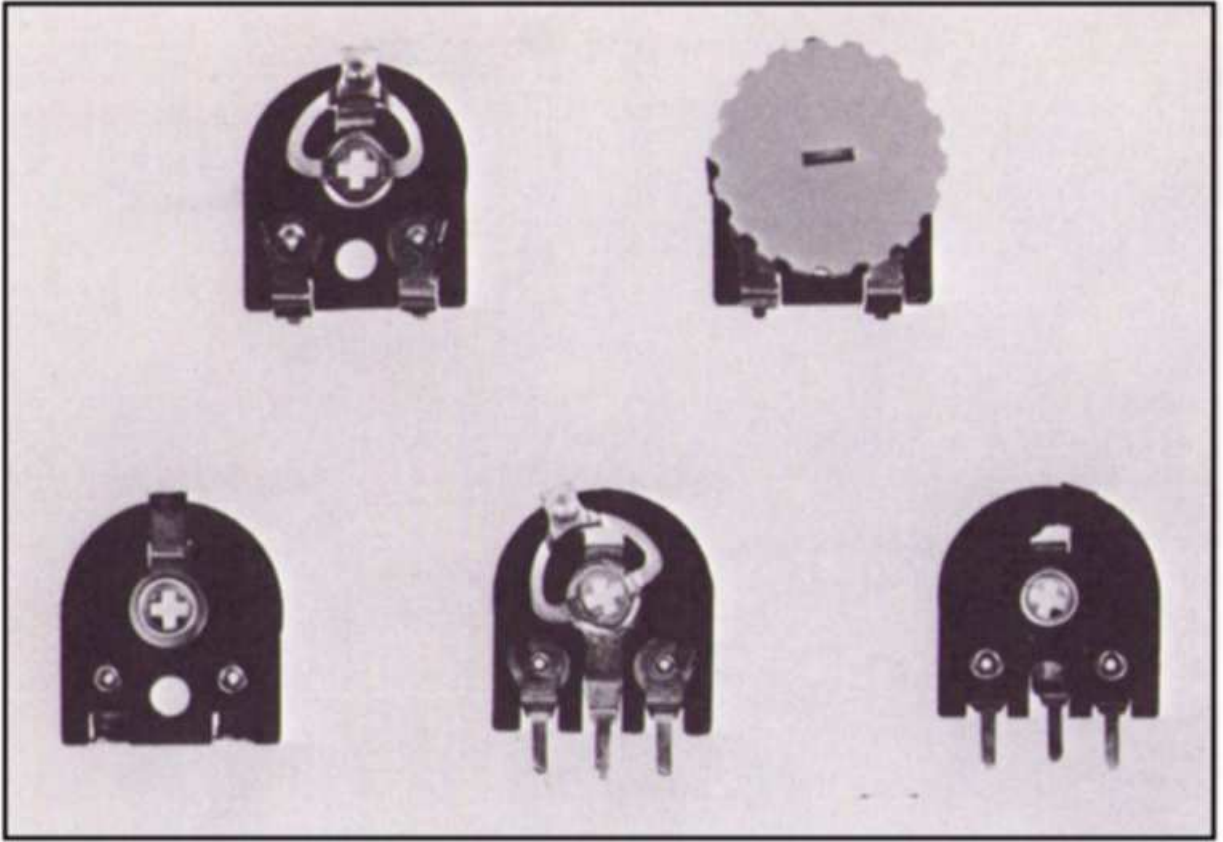


Fig. 3-31

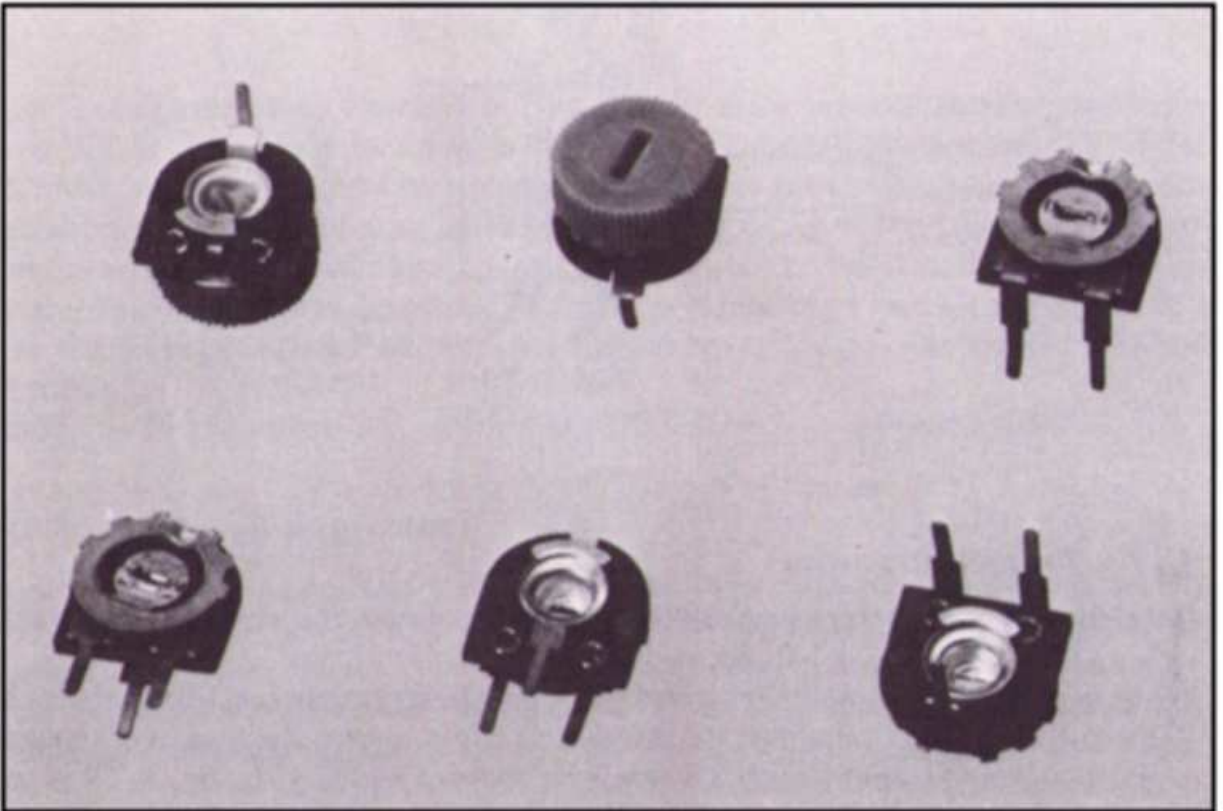


Fig. 3-32

3.17.5. Instelpotentiometers

Deze potentiometers worden in grote verscheidenheid op de markt gebracht. De meest eenvoudige uitvoering bestaat uit een plaatje hardpapier waarop een koolbaan is aangebracht. De looper is daarbij voorzien van een gleuf om de vereiste weerstandswaarde met een schroefvedraaijer te kunnen instellen. In fig. 3-31 zijn enkele veel voorkomende uitvoeringen afgebeeld.

Een speciaal soort instelpotentiometers vormen de miniatuur instelpotentiometers, waarvan in fig. 3-32 enkele uitvoeringen zijn afgebeeld. De meeste instelpotentiometers zijn voorzien van aansluitstiften voor montage op panelen met een gedrukte bedrading.

3.17.6. Schuifpotentiometers

Deze potentiometers bestaan uit een behuizing van kunststof waarin een rechte koolbaan, die is aangebracht op een drager van hardpapier, is ondergebracht. De looper is van verzilverd messing en wordt voortbewogen door:

- 1 – verschuiving van de looper met de hand,
- 2 – verdraaiing van een as die is voorzien van schroefdraad, waardoor de looper wordt meegenomen.

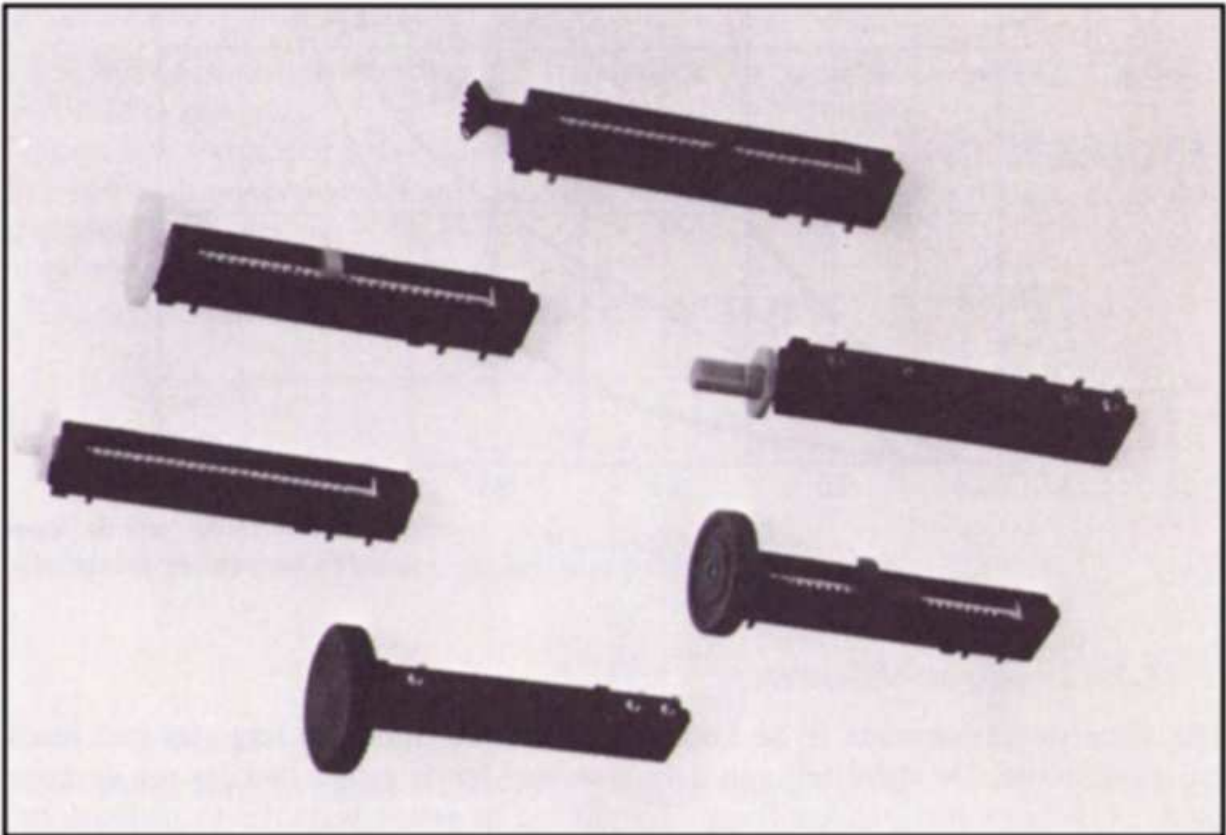
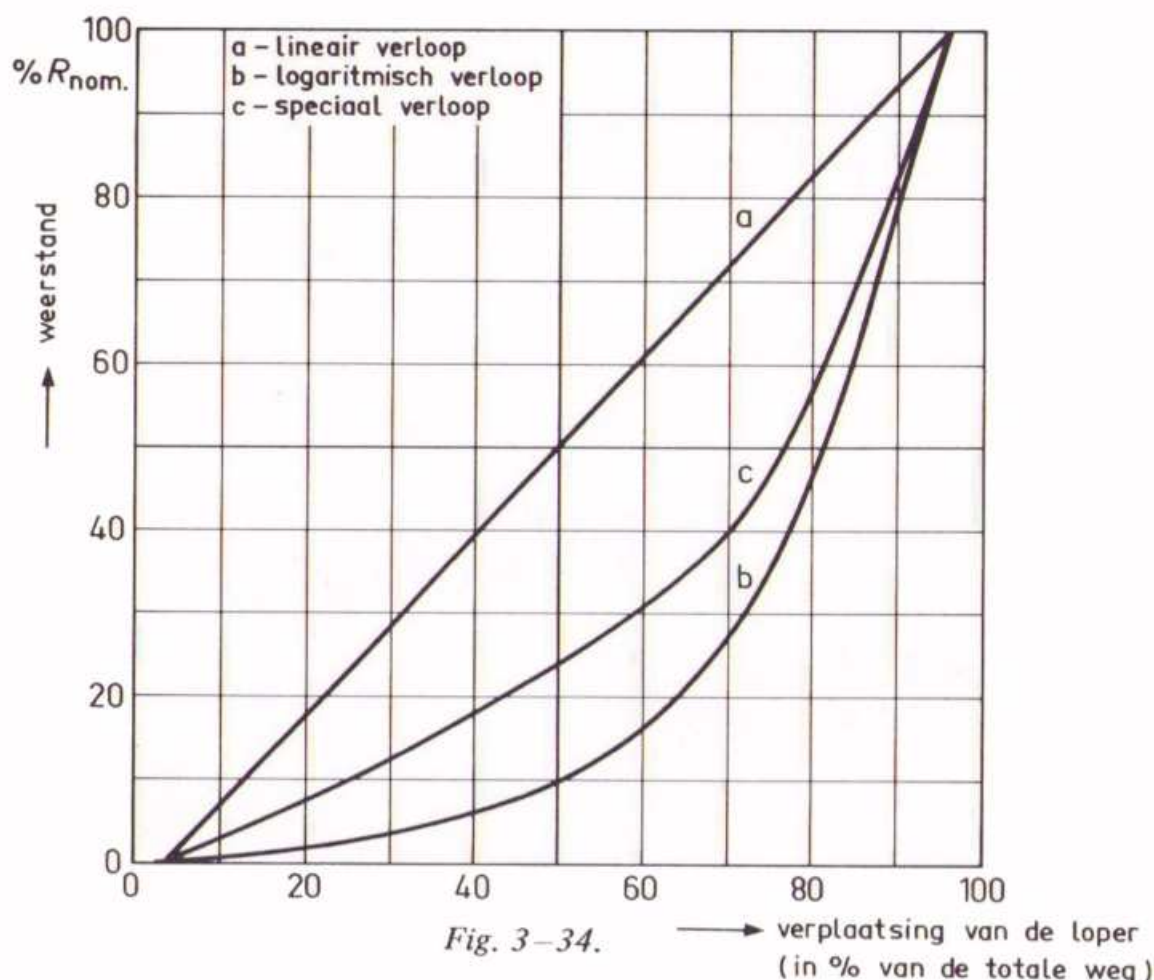


Fig. 3-33

Genoemde potentiometers zijn leverbaar met een lineaire en met een logaritmische karakteristiek, al dan niet voorzien van een vaste aansluiting in het midden van de koolbaan. In fig. 3–33 zijn enkele uitvoeringen afgebeeld.

De onder punt 2 vermelde potentiometers worden vooral toegepast in afstem-eenheden (tuners) van TV- en FM-ontvangers, die werken met een capaciteitsdiode. Ze lenen zich echter ook voor andere doeleinden en zijn te preferen wanneer een nauwkeurige instelling wordt vereist. Veel uitvoeringen zijn dan ook voorzien van een schaalverdeling. Het weerstandsbereik bedraagt veelal 0–10 k Ω ; het maximaal toelaatbare vermogen is $\frac{1}{8}$ W bij 70 °C. In fig. 3–34 is een grafiek getekend, die het verband aangeeft tussen het weerstandsverloop en de daarmee overeenkomen-de verplaatsing van de loper.



3.17.7. Cermet-potentiometers

Bij deze potentiometers is de koolbaan vervangen door een laag glas met daarin metaaldeeltjes. De stabiliteit van deze weerstanden is groter dan die van de instel-potentiometers met een koolbaan. Toepassing in eerste instantie in professionele apparatuur. Er worden zowel gesloten als open constructies op de markt gebracht. In fig. 3–35 zijn enkele uitvoeringen afgebeeld.

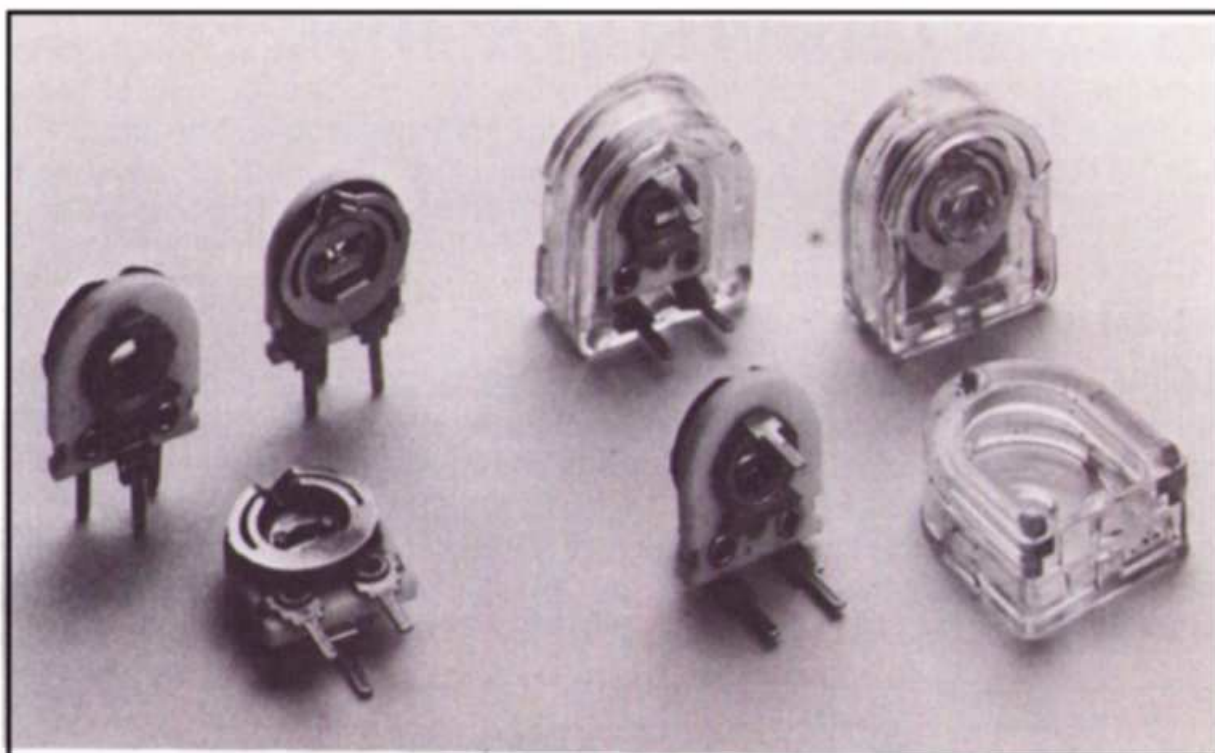


Fig. 3-35

3.17.8. Enkele opmerkingen over potentiometers

1. Koolbaanpotentiometers dienen „stroomloos” te worden geschakeld. Om een voorbeeld te noemen:

Wanneer een dergelijke potentiometer dient voor volume- dan wel toonregeling bij bijv. een radio-ontvanger, moet worden vermeden dat er gelijkstroom door de looper vloeit.

Dit in verband met de stabiliteit en de ruis.

2. Kies de verhouding R_t/r_o niet te groot (zie fig. 3-36).

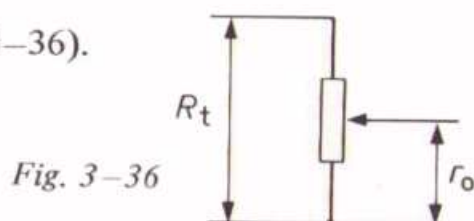


Fig. 3-36

3. Belast de looper niet te zwaar. In het algemeen geldt:

$$I_{\text{loper}} \leq \sqrt{\frac{P_{\text{max}}}{R_{\text{totaal}}}}$$

4. Kies steeds een uitvoering waarbij P_{max} aan de ruime kant is.

5. Een krakende potentiometer moet uiteindelijk worden vernieuwd, doch het euvel kan vaak verholpen worden door de potentiometer te behandelen met contactreiniger (spuitbus).

4. Niet-lineaire weerstanden

4.1. Indeling

Bij deze weerstanden is het verband tussen de grootte van de spanning over de weerstand en de sterkte van de stroom, die door de weerstand vloeit als gevolg van deze spanning, niet-lineair. Een verdubbeling van de aangelegde spanning resulteert in het algemeen dan ook niet in een tweemaal groter worden van de stroom door de weerstand. In de stroom/spanningsgrafiek wordt het karakter van een dergelijke weerstand dan ook weergegeven door een gebogen lijn. In fig. 4-1 is de stroom/spanningsgrafiek van een niet-lineaire weerstand afgebeeld.

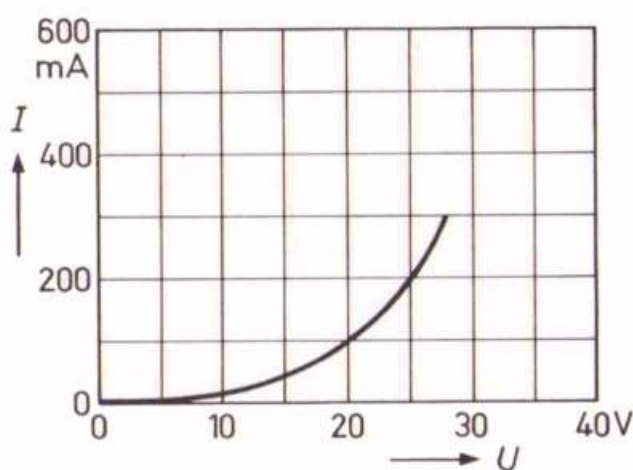


Fig. 4-1

Aan de hand van hun eigenschappen kunnen de niet-lineaire weerstanden in de volgende groepen worden ondergebracht:

- spanningsafhankelijke weerstanden;
- weerstanden met een negatieve temperatuurcoëfficiënt;
- weerstanden met een positieve temperatuurcoëfficiënt;
- lichtgevoelige weerstanden;
- mechanisch gevoelige weerstanden;
- magnetisch gevoelige weerstanden.

4.2. Spanningsafhankelijke weerstanden

Deze weerstanden worden gewoonlijk aangeduid met de hoofdletters VDR. Dit zijn de eerste letters van de Engelse benaming Voltage Dependent Resistor, het-

geen letterlijk vertaald „spanningsafhankelijke weerstand” betekent. De karakteristieke eigenschap van een VDR is het feit dat de weerstandswaarde afneemt, naarmate de spanning over de weerstand groter wordt. In fig. 4–2 is bij wijze van voorbeeld een grafische voorstelling getekend, die het verband weergeeft tussen de sterkte van de stroom (I) welke door de VDR vloeit en de grootte van de bijbehorende spanning (U) over de VDR.

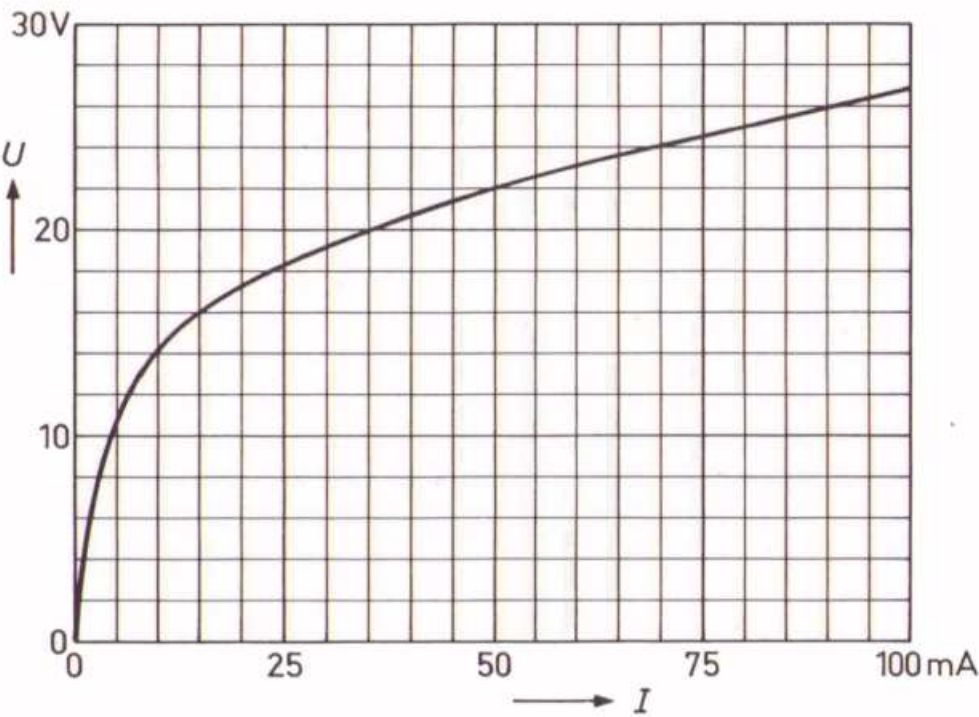


Fig. 4–2

Uit deze grafiek is de grootte van de weerstand voor verschillende waarden van de aangelegde spanning te bepalen (zie onderstaande tabel).

U (V)	I (mA)	R (Ω)
7,5	2,5	3000
12	6	2000
14	10	1400
20	35	570
24	70	345
27	100	270

De relatie tussen de spanning over en de stroom door de VDR wordt bij benadering weergegeven door de formule:

$$U = C \cdot I^\beta$$

Hierin is:

U de spanning over de VDR (V);

I de stroom door de VDR (A);

C een constante waarvan de grootte wordt bepaald door de afmetingen;

β een constante waarvan de grootte wordt bepaald door het materiaal en het fabricageproces.

De grootheden C en β worden door de fabrikant gepubliceerd.

Uit bovenstaande formule volgt dat de grootheid C de spanning over de VDR is, als door deze weerstand een stroom van 1 A vloeit.

Voorbeeld: Als $I = 1$ A en de bijbehorende waarde van $U = 250$ V, dan betekent dit dat $C = 250$. Als verder gegeven is dat $\beta = 0,20$, dan kan het gedrag van deze weerstand worden vastgelegd door de formule:

$$U = 250 \cdot I^{0,20}$$

Als $I = 10$ mA, is de spanning over de weerstand als volgt te berekenen:

$$U = 250 \cdot 0,01^{0,20} = 250 \cdot 10^{-2/5} = \frac{250}{\sqrt[5]{100}} = 100 \text{ V}$$

Dergelijke berekeningen met gebroken exponenten vragen nogal wat rekenwerk, vandaar dat het nomogram, afgebeeld in fig. 4–3, is opgesteld. Dit nomogram geeft de samenhang aan tussen de spanning (U), de stroomsterkte (I), het elektrisch vermogen dat in de VDR in warmte wordt omgezet (P) en de waarde van β .

Voorbeeld: Van een VDR is gegeven dat wanneer over deze weerstand een spanning van 100 V aanwezig is, de stroom 10 mA bedraagt. Verder is nog bekend dat $\beta = 0,19$.

Gevraagd wordt om de stroomsterkte bij een spanning van 70 V over de weerstand te bepalen.

Er wordt nu een rechte lijn getrokken, die de punten 0,01 (I -kolom) en 100 (U -kolom) met elkaar verbindt. Genoemde rechte wordt vervolgens doorgetrokken tot de verticale lijn gemerkt met $\beta = 0,19$ wordt gesneden. Hierna wordt een andere rechte lijn getrokken die het aldus verkregen snijpunt op de rechte ($\beta = 0,19$) verbindt met 70 op de U -kolom. Na verlenging snijdt deze lijn de I -kolom ter plaatse 0,0016. Dit betekent dat de stroomsterkte in deze VDR 1,6 mA bedraagt als de spanning over de weerstand 70 V is. Het vermogen dat in de VDR in warmte wordt omgezet, is in het nomogram uitgezet langs de P kolom. Bij 70 V bedraagt dit vermogen voor de betreffende VDR $= 0,11$ W.

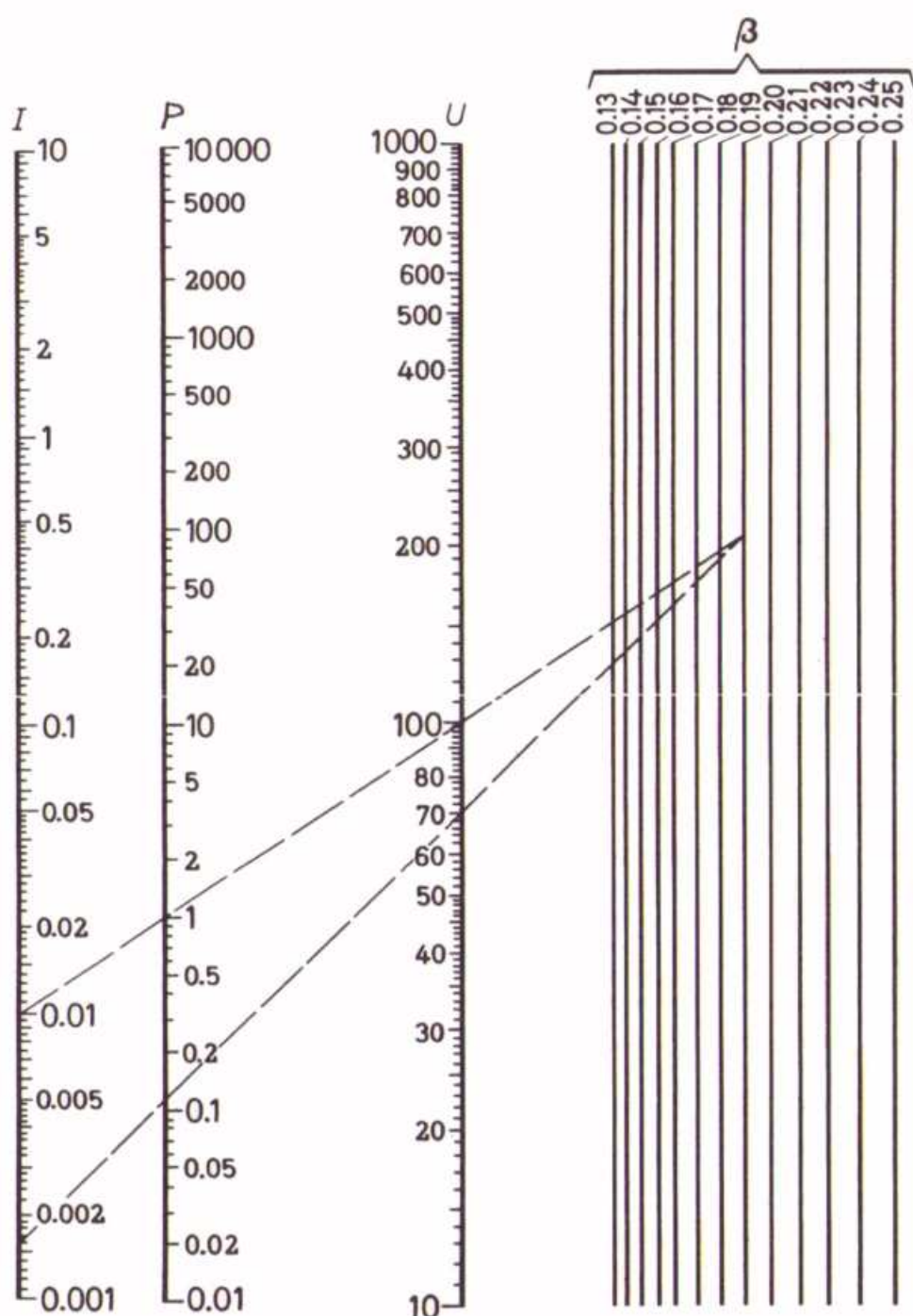


Fig. 4-3

4.2.1. Serieschakeling van VDR's

Wanneer n volkomen gelijke VDR's in serie worden geschakeld en aangesloten op een spanning van nU volt, dan geldt voor de vervangschakeling van deze weerstanden:

$$n \cdot U = C' \cdot I^\beta \quad \text{zodat } C' = n \cdot C$$

Zie ook fig. 4-4.

Dit betekent dat de waarde van C groter wordt, naarmate meer VDR's in serie worden geschakeld. In de praktijk is het verband tussen de stroom en de spanning van een serieschakeling van VDR's met gelijke waarden van β snel te bepalen uit de I/U -karakteristiek. Worden twee volkomen gelijke VDR's in serie geschakeld, dan betekent dit dat de spanning over de serieschakeling tweemaal zo groot is als de spanning over één van deze VDR's. In fig. 4-5 is bij wijze van voorbeeld de I/U -karakteristiek van een VDR afgebeeld. Uit deze grafiek volgt dat de spanning over de VDR 6 V bedraagt als er een stroom van 50 mA door de weerstand vloeit. Worden nu twee van deze weerstanden in serie geschakeld, dan bedraagt de spanning over de serieschakeling $6 + 6 = 12$ V bij dezelfde stroomsterkte van 50 mA. Bij 100 mA is deze spanning dan 15 V en bij 190 mA 18 V. Worden een aantal van de

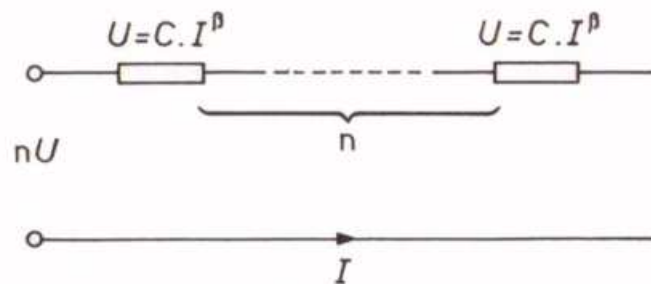


Fig. 4-4

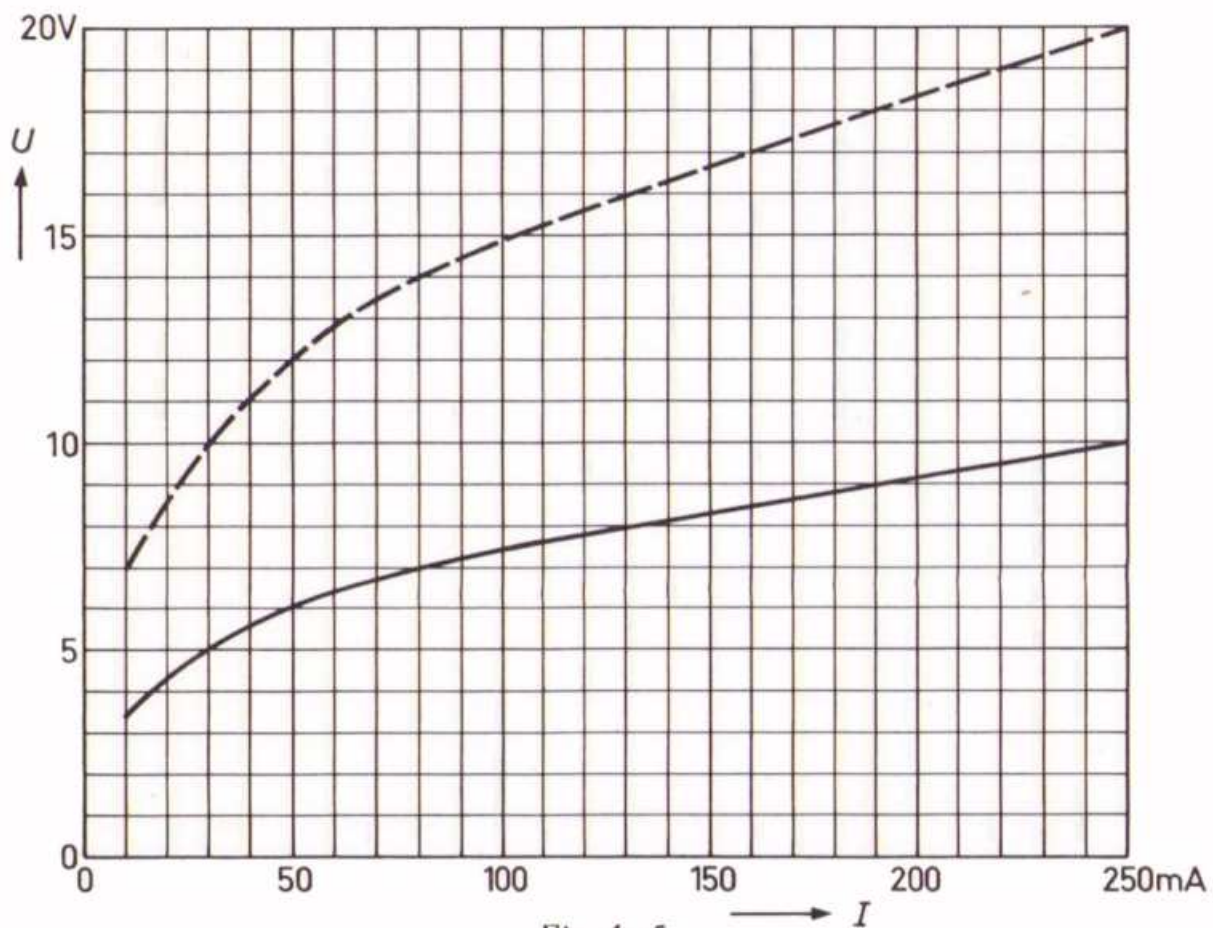


Fig. 4-5

aldus verkregen punten door een vloeiende kromme met elkaar verbonden, dan geeft deze lijn het verband aan tussen de stroom die door de in seriegeschakelde VDR's vloeit en de spanning over de serieschakeling. In fig. 4-5 is dit verband aangegeven door een streepjeslijn.

4.2.2. Parallelschakeling van VDR's

Voor een VDR geldt:

$$U = C \cdot I^\beta$$

Worden n van deze weerstanden (met gelijke waarden voor C en β) parallel geschakeld, dan is de waarde van U voor elk van deze weerstanden even groot. De totale stroomsterkte wordt echter n maal groter dan die van één weerstand. Verder verandert ook de waarde van C . De nieuwe relatie tussen stroomsterkte en spanning wordt in dat geval:

$$U = C' (n \cdot I)^\beta$$

Dit betekent dat:

$$C' = \frac{C}{n^\beta}$$

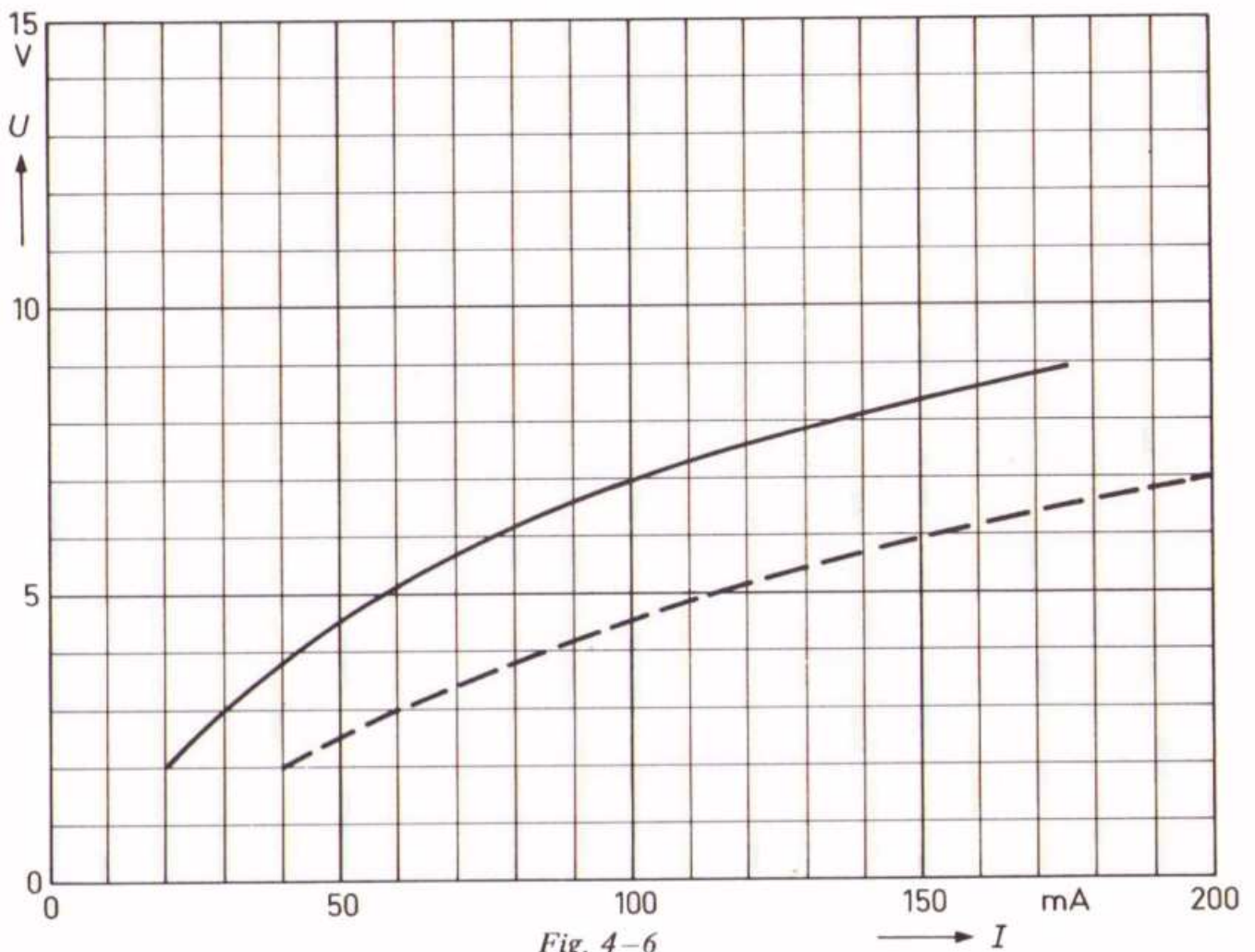


Fig. 4-6

Aangezien de waarde van β varieert tussen 0,15 en 0,35, zal de waarde van C slechts weinig veranderen door het parallelschakelen van de VDR's. Er dient echter wel te worden gelet op het feit dat de waarden van C en β van de parallel te schakelen weerstanden nagenoeg even groot moeten zijn.

Ook hier kan rekenwerk worden bespaard door te werken met grafieken. In fig. 4–6 is een I/U -karakteristiek van een VDR afgebeeld. De situatie wordt nu zo, dat bij een bepaalde waarde van U de bijbehorende stroomsterkte wordt verdubbeld als twee volkomen gelijke VDR's parallel worden geschakeld. Voor de VDR waarop de grafiek van fig. 4–6 van toepassing is, geldt dat bij een $U = 6 \text{ V}$ een stroom van 75 mA hoort. Worden twee van deze weerstanden parallel geschakeld, dan wordt de stroom door de schakeling gelijk aan de dubbele waarde, dus 150 mA. Dit om een voorbeeld te noemen.

Opmerking: VDR's mogen niet worden parallelgeschakeld met de opzet om de toelaatbare dissipatie te vergroten.

4.2.3. De weerstandswaarde

De inwendige weerstand van een VDR wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de spanning over de weerstand en de stroom die als gevolg van deze spanning door de weerstand vloeit.

Dit betekent dat:

$$\begin{aligned} R &= \frac{U}{I} = \frac{C \cdot I^\beta}{I} \\ &= C \cdot I^{(\beta-1)} \\ &= \frac{C}{I^{(1-\beta)}} \end{aligned}$$

(de laatste uitdrukking is praktischer aangezien $\beta < 1$).

Uitgedrukt in de spanning is het verband iets gecompliceerder n.l.:

$$R = \frac{C^{1/\beta}}{U^{(1/\beta-1)}}$$

Hieruit blijkt nog eens duidelijk dat R geen constante waarde heeft, doch afhankelijk is van de grootte van I en U .

4.2.4. Dissipatie

Het vermogen dat in de VDR in warmte wordt omgezet, is te berekenen met:

$$P = U \cdot I = C \cdot I^{(\beta+1)} = \frac{1}{C^{1/\beta}} \cdot U(1 + 1/\beta)$$

Voorbeeld: Indien $\beta = 0,2$, dan is $1/\beta = 5$.

Zodat het vermogen dat in warmte wordt omgezet, evenredig is met de zesde macht van het aangelegde spanning

$$P = \frac{1}{C^5} \cdot U^6$$

(De waarde van C wordt door de fabrikant gepubliceerd.) Uit dit voorbeeld blijkt dat een verhoging van de aangelegde spanning met 12% resulteert in een verdubbeling van het vermogen, dat in warmte wordt omgezet ($1,12^6 = 2$).

Het is dus zeer belangrijk dat de maximaal toelaatbare spanning nooit wordt overschreden. Dit laatste is des te ernstiger omdat de temperatuurcoëfficiënt van het weerstandsmateriaal negatief is, zodat de weerstandswaarde afneemt naarmate de temperatuur stijgt.

4.2.5. Serieschakeling van VDR en lineaire weerstand

Indien een VDR in serie wordt geschakeld met een lineaire weerstand is de spanning over de serieschakeling gelijk aan:

$$\begin{aligned} U &= U_R + U_{VDR} \\ &= I \cdot R + C \cdot I^\beta \end{aligned}$$

Zie fig. 4–7.

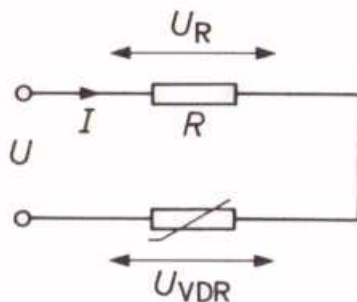


Fig. 4–7

Bij wijze van voorbeeld wordt nu de serieschakeling van een VDR en een lineaire weerstand van 500Ω bestudeerd. In fig. 4–8 is daartoe de I/U -karakteristiek van de betreffende VDR afgebeeld. Uit de grafiek volgt dat wanneer een stroom van 35 mA door de VDR vloeit, over deze weerstand een spanning van 20 V aanwezig is. De spanning over de lineaire weerstand, die in serie is geschakeld met de VDR, bedraagt daarbij $500 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 17,5$ V. De spanning over de serieschakeling is in dat geval gelijk aan de som van beide spanningen en bedraagt zodoende 37,5 V. Wordt laatstgenoemde spanning voor meer waarden van de stroom bepaald en de gevonden punten door een vloeiende lijn met elkaar verbonden, dan ontstaat de

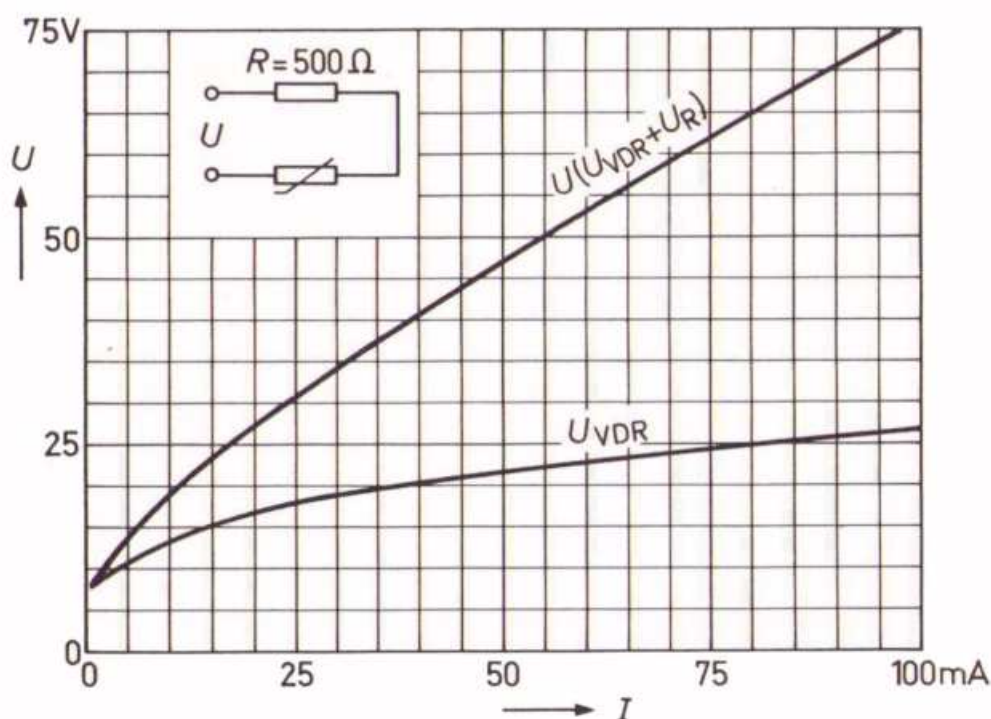


Fig. 4–8

kromme $U = (U_{VDR} + U_R)$. Uit fig. 4–8 volgt dat de helling van de kromme U toeneemt, naarmate de lineaire weerstand groter wordt.

In zeer veel publicaties wordt het verband tussen de spanning en de stroomsterkte

$$U = C \cdot I^\beta$$

op dubbellogaritmische schaal getekend. Dit heeft het voordeel dat de grafiek in dat geval een rechte lijn wordt, want:

$$\log U = \log C + \beta \log I$$

In fig. 4–9 is een dergelijke grafiek afgebeeld. De grootheid β is in deze figuur de richtingscoëfficiënt van de rechte lijn, die het verband tussen U en I weergeeft ($\beta = \tan \varphi$).

Het gedrag van een VDR is niet afhankelijk van de polariteit van de aangelegde spanning (een uitzondering hierop vormen de zgn. asymmetrische VDR's). Dit betekent dat deze weerstanden geschikt zijn voor gebruik in wisselstroomketens. Het verband tussen de stroomsterkte en de spanning is echter niet-lineair. Dit betekent dat wanneer de aangelegde spanning sinusvormig verloopt als functie van de tijd, de stroom een niet-sinusvormig karakter heeft, terwijl het omgekeerde eveneens geldt. In fig. 4–10 komt dit verband duidelijk tot uitdrukking. Opgemerkt zij nog dat de vervorming veroorzaakt wordt door oneven harmonischen.

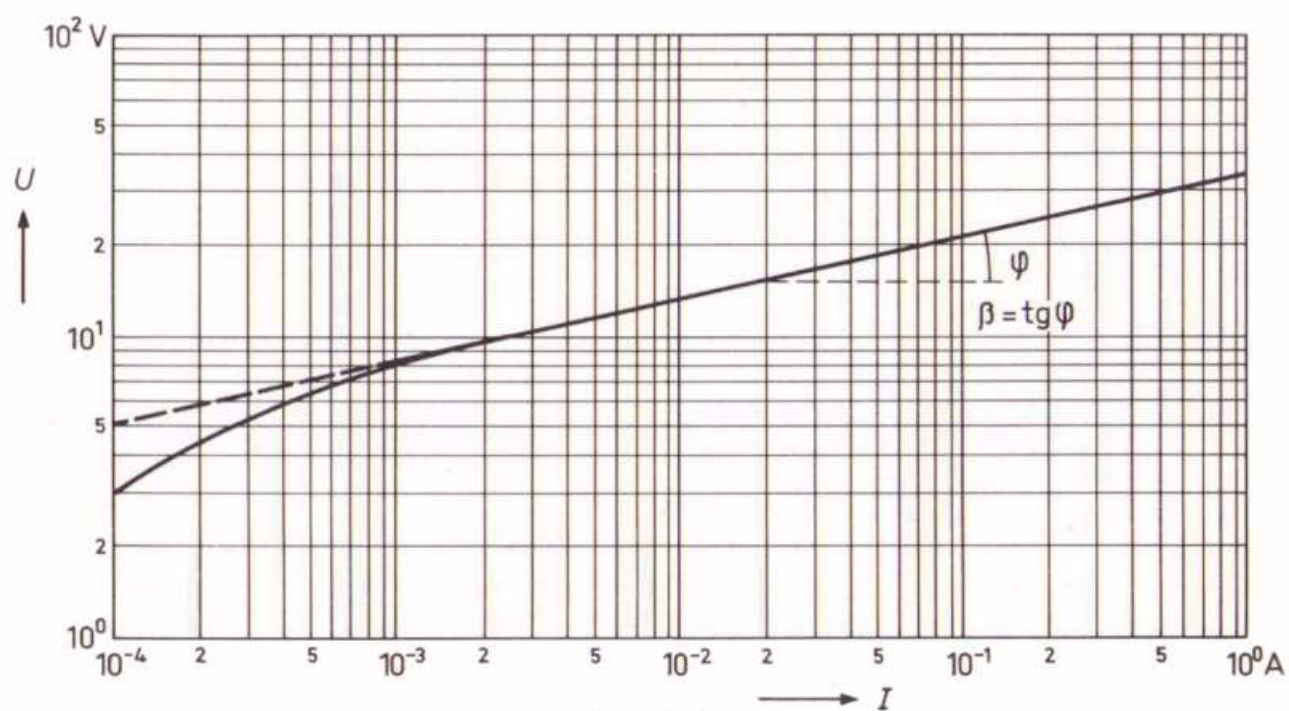


Fig. 4-9

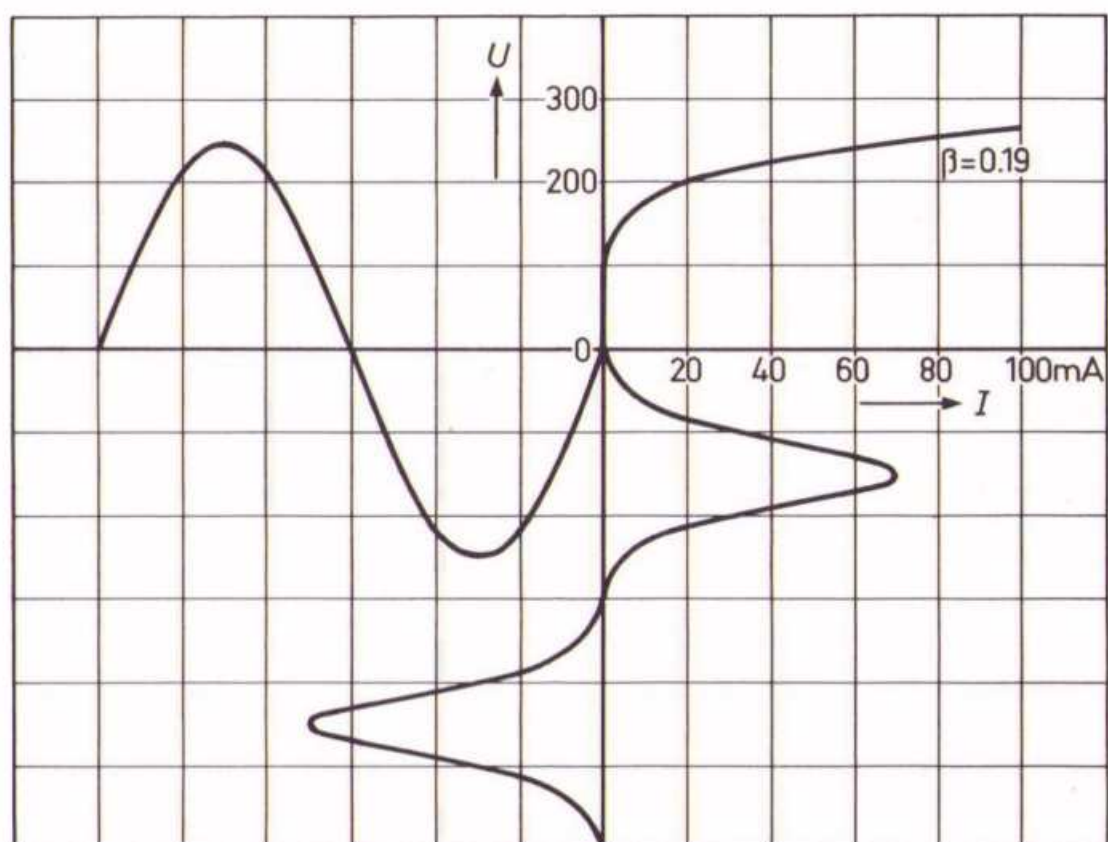


Fig. 4-10

4.2.6. Het controleren van VDR's

Bij deze metingen, die tot doel hebben om zonder kostbare meetopstellingen te kunnen nagaan of een VDR nog goed functioneert, wordt uitgegaan van stroom/spanningsmetingen. Hierbij dienen de volgende punten in acht te worden genomen:

1. Werk altijd met gelijkspanning,
2. Houd de tijdsduur van de eigenlijke meting zo kort mogelijk, dit om te voorkomen dat het gedrag van de VDR wordt beïnvloed door eventuele warmteontwikkeling.

Opmerking: Voor het geval dat het produkt van de te meten stroom en spanning de maximaal toelaatbare waarde overschrijdt, dient de meting te worden uitgevoerd met een kanteelspanning van korte tijdsduur.

Voor het verrichten van de metingen wordt de schakeling afgebeeld in fig. 4-11 toegepast. De voltmeter (v) dient daarbij hoogohmig te zijn, b.v. een transistor-voltmeter.

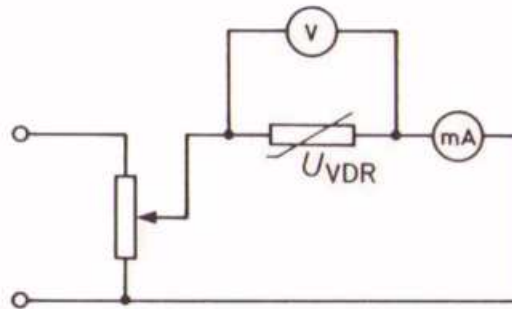


Fig. 4-11

In het voorgaande is vastgesteld dat het gedrag van een VDR wordt bepaald door drie grootheden, nl.: de spanning met bijbehorende stroomsterkte en de waarde van β .

Het bepalen van β

Hiertoe worden twee spanningsmetingen uitgevoerd. In de eerste plaats wordt de spanning (U_2) over de VDR gemeten als er een stroom door vloeit, waarvan de sterkte gelijk is aan 0,3 van de nominale waarde. Hierna wordt de spanning U_1 gemeten, behorend bij een stroomsterkte gelijk aan 3 maal de nominale waarde. De waarde van β is dan te berekenen uit het verband:

$$\beta = \log \frac{U_1}{U_2}$$

Het bovenstaande volgt direct uit:

$$\log U_1 = \beta \log 3 I_n + \log C$$

$$\log U_2 = \beta \log 0,3 I_n + \log C$$

$$\log U_1 - \log U_2 = \beta (\log 3 I_n - \log 0,3 I_n) \quad (-)$$

$$\log U_1 - \log U_2 = \beta (\log 3 I_n - \log 0,3 I_n)$$

of

$$\log \frac{U_1}{U_2} = \beta \log \frac{3 I_n}{0,3 I_n} = \beta$$

De gekozen waarden $3 I_n$ en $0,3 I_n$ houden verband met het feit dat β geen constante is, doch binnen bepaalde grenzen van waarde verandert. De grootte van β wordt dan ook vaak gepubliceerd als $\beta = 0,25 - 0,40$ om slechts een voorbeeld te noemen.

In veel gevallen kan echter worden volstaan met het meten van twee punten van de stroom/spanningskarakteristiek en deze op dubbellogaritmische schaal uit te zetten. De rechte verbindingslijn van deze punten geeft in dat geval bij benadering het gedrag van de betreffende VDR aan. Zie fig. 4-12. In deze figuur is de rechte nog doorgetrokken aan beide zijden van de meetpunten.

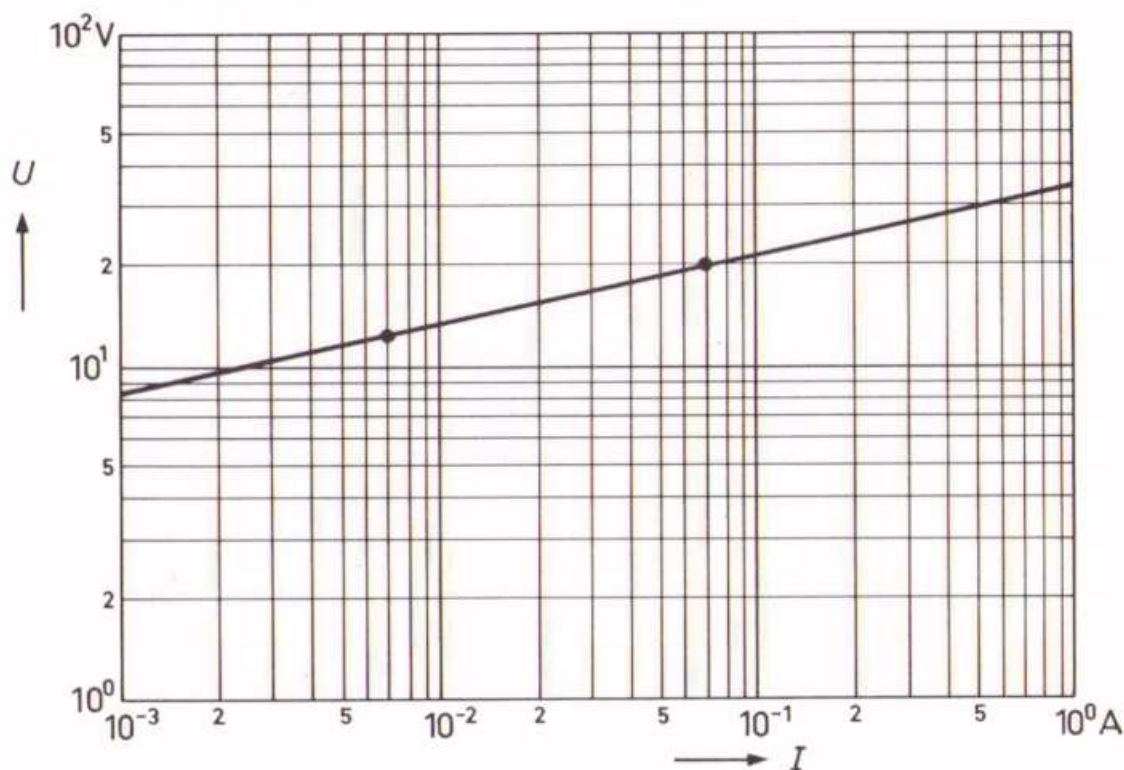


Fig. 4-12

4.2.7. Samenstelling van VDR's

VDR's bestaan gewoonlijk uit korrels silicium-carbide, (SiC), titaan-oxyde (TiO_2) dan wel zinkoxyde (ZnO), die samen met een bindmiddel in de vereiste vorm worden geperst. Meestal zijn dit schijfjes of staafjes. Na een droogperiode wordt het geheel bij hoge temperatuur gesinterd. Het materiaal dat zodoende wordt verkregen, is zeer hard en poreus en moet na aanbrenging van de aansluitdraden of aansluitpunten worden bedekt met een of meer lagen beschermende lak. Tot slot wordt dan meestal nog een aanduiding in de vorm van een kleurcode op de weerstand aangebracht. De werking berust in grote trekken op de veranderlijke contactweerstand tussen de verschillende kristallen SiC , TiO_2 , en ZnO . In fig. 4-13 zijn enkele soorten VDR's afgebeeld.

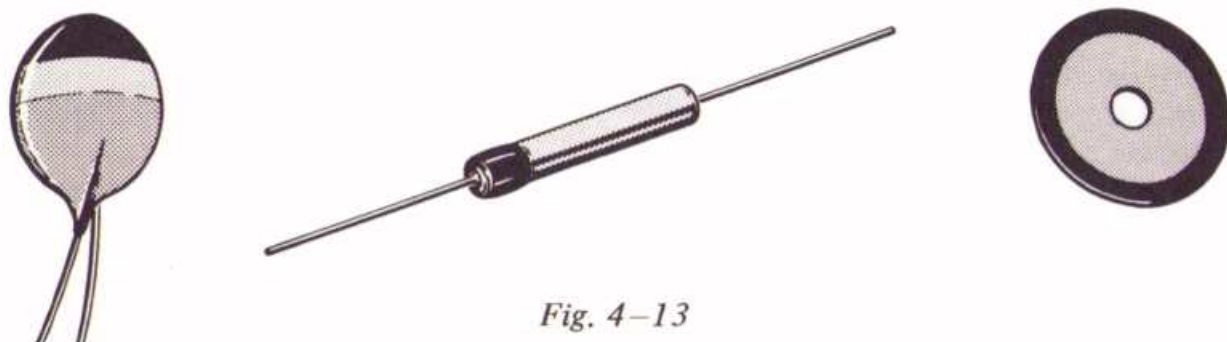


Fig. 4-13

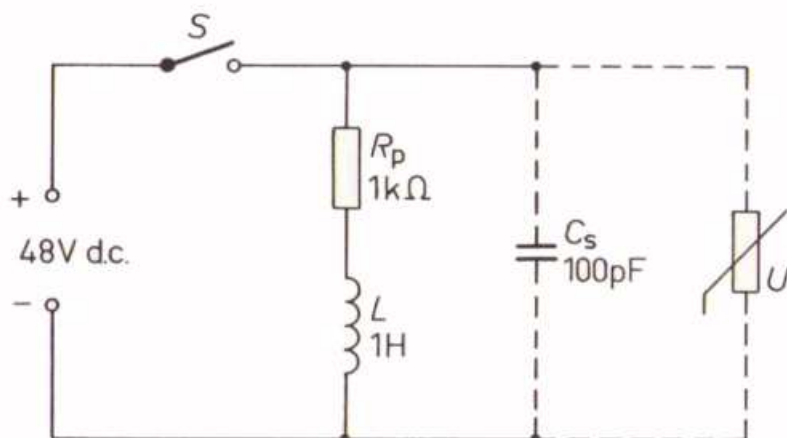


Fig. 4-14

Karakteristieke waarden van β zijn:

Soort VDR	β
SiC	0,2–0,4
TiO ₂	0,15
ZnO	0,035

4.2.8. Toepassingen van VDR's

De toepassingen hebben in eerste instantie betrekking op het beveiligen van andere onderdelen. Ze worden dan ook veelvuldig toegepast in de meest uiteenlopende apparatuur. In de schakeling die is afgebeeld in fig. 4-14 worden de contacten van een schakelaar beveiligd door een VDR. Wordt de schakelaar geopend, dan kan een hoge spanning tussen de contacten optreden als gevolg van de opgehoopte energie in de zelfinductie. Een stijging van de spanning resulteert echter onmiddellijk in een daling van de weerstand van de VDR, zodat de spanningstoename op deze wijze wordt begrensd.

Rekenvoorbeeld

Als in fig. 4-14 de VDR niet is aangebracht, is de desbetreffende spanning als volgt te berekenen: Bij gesloten schakelaar vloeit door de serieschakeling van weerstand en zelfinductie een stroom:

$$I = \frac{U}{R_p} = \frac{48}{1000} = 48 \text{ mA}$$

De hoeveelheid energie die zodoende in de zelfinductie wordt opgeslagen bedraagt dan:

$$P = \frac{1}{2} I^2 L = \frac{0,048^2 \cdot 1}{2} = 1,15 \text{ mJ.}$$

Wordt de schakelaar nu geopend, dan wordt

$$P = \frac{1}{2} I^2 L = \frac{1}{2} C_s U^2$$

C_s is de parasitaire capaciteit van de zelfinductie. Dit betekent dat

$$U = I \sqrt{\frac{L}{C_s}} = 4800 \text{ V}$$

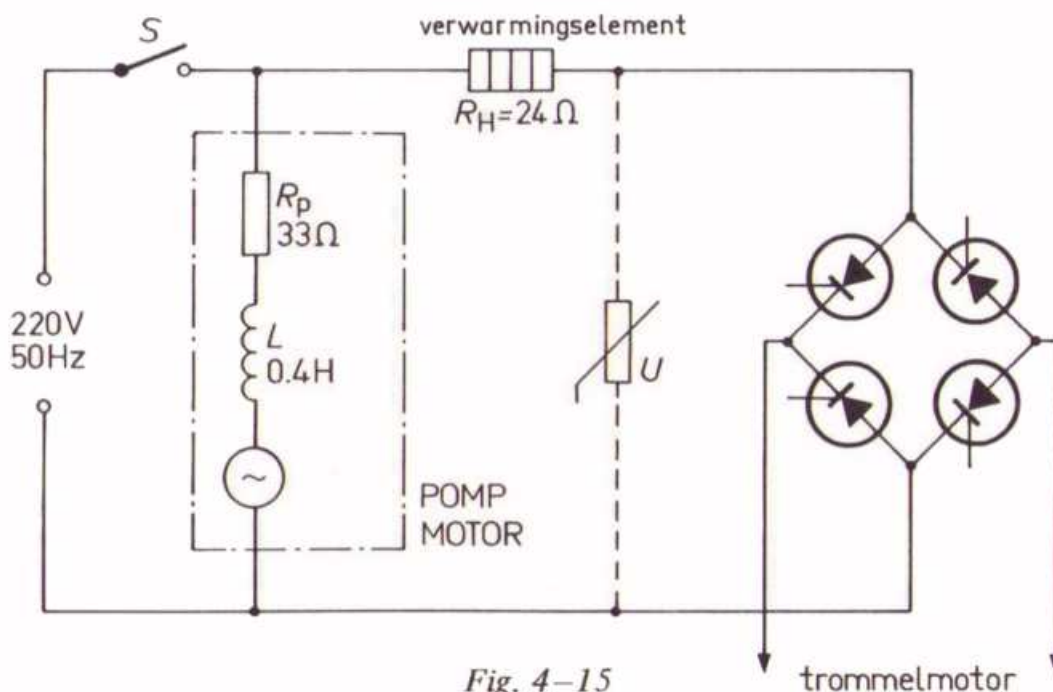
De spanning over de schakelcontacten bedraagt in dat geval 4848 V zodat vonkvorming optreedt.

Wordt parallel aan de serieschakeling van weerstand en zelfinductie een VDR geschakeld, dan vloeit door deze VDR een stroom van 48 mA als de schakelaar wordt geopend. De spanning over de VDR bedraagt dan:

$$U = 144 \cdot 0,048^{0,035} = 130 \text{ V}$$

als $C = 144$ en $\beta = 0,035$ (Er is dus sprake van een ZnO type). De spanning over de schakelcontacten bedraagt nu slechts $130 + 48 = 178 \text{ V}$ in plaats van 4848 V.

De VDR in de schakeling, afgebeeld in fig. 4–15 heeft tot taak om de thyristorbrug van een wasmachine te beschermen tegen te hoge spanningen.



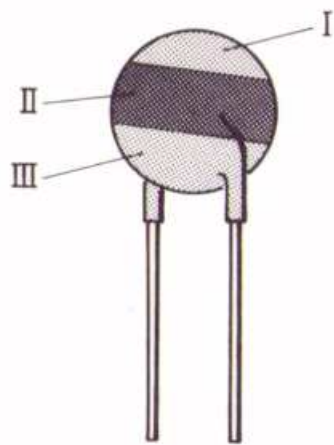
Spanningsstabilisatie vormt een tweede belangrijk toepassingsgebied. Onder de factor S wordt daarbij de verhouding

$$\frac{\Delta U/U}{\Delta U_2/U_2} \text{ verstaan.}$$

Zonder belasting bedraagt $S = \left[\frac{1}{\beta} - \frac{1 - \beta}{\beta} \right] \frac{U_2}{U}$

en met belastingsweerstand $S = \left[\frac{1}{\beta} - \frac{1 - \beta}{\beta} \right] \left[\frac{U_2/U + I_2/I_1}{1 + I_2/I_1} \right]$

4.2.9. Philips-codering van schijfvormige VDR's



I_{nom} (mA)		U_{nom} (V)				
Band I	Band II	Band III				
↓	Kleur	zwart	rood	geel	blauw	grijs
100	bruin	—	—	—	8	10
10	rood	12	15	18	22	27
1	oranje	33	39	47	56	68
—	geel	82	100	120	150	180
—	groen	220	270	330	—	—

Voorbeeld: Een schijfvormige VDR met kleuren: rood, oranje en blauw geeft aan dat van deze weerstand $I_{\text{nom}} = 10 \text{ mA}$ en U bij $I_{\text{nom}} = 56 \text{ V}$.

4.3. Licht-afhankelijke weerstanden

Een licht-afhankelijke weerstand wordt gewoonlijk aangeduid als LDR. Dit zijn de eerste letters van de woorden Light Dependent Resistor, hetgeen de Engelse vertaling is van licht-afhankelijke weerstand. Zoals de benaming reeds aangeeft, hebben we hier te maken met een weerstand waarvan de weerstandswaarde wordt beïnvloed door het opvallende licht. In totale duisternis is de weerstandswaarde zeer hoog en wordt kleiner naarmate de verlichtingssterkte aan de oppervlakte van de weerstand toeneemt. In fig. 4–16 is de relatie tussen de weerstandswaarde R (uitgedrukt in Ω) en de verlichtingssterkte E (uitgedrukt in lux) voor een bepaald type LDR op dubbel-logaritmische schaal uitgezet. Uit de grafiek blijkt dat de weerstandswaarde van deze LDR in absolute duisternis ongeveer $10\text{ M}\Omega$ bedraagt en bij een verlichtingssterkte van 1000 lux is gedaald tot $200\text{ }\Omega$. Een verlichtingssterkte van 1000 lux is de verlichtingssterkte, zoals die bijv. gewenst is in een tekenkamer. De daling van de weerstandswaarde is toe te schrijven aan de toename van mobiele ladingsdragers (geleidingselektronen) als gevolg van energietoevoer in de vorm van licht.

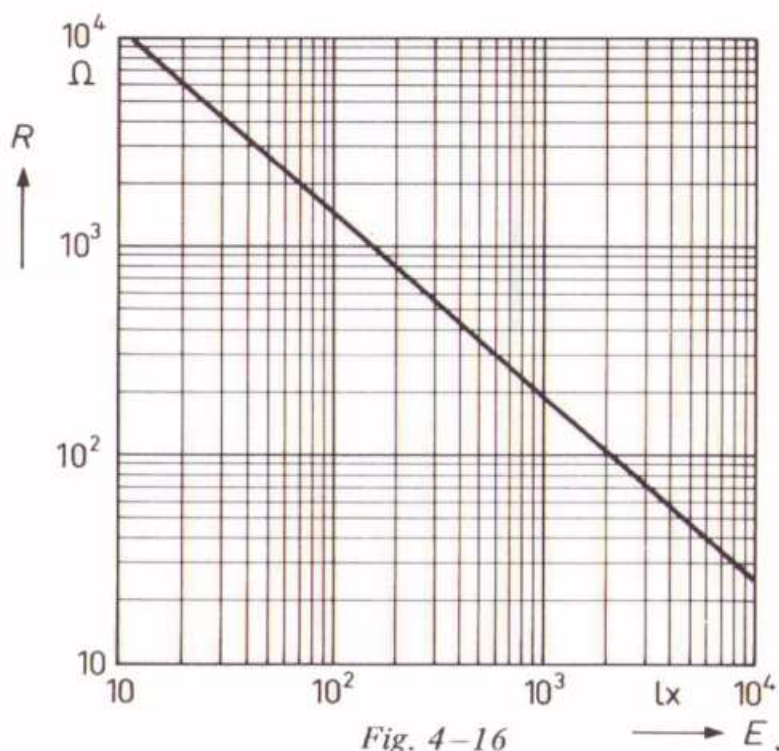
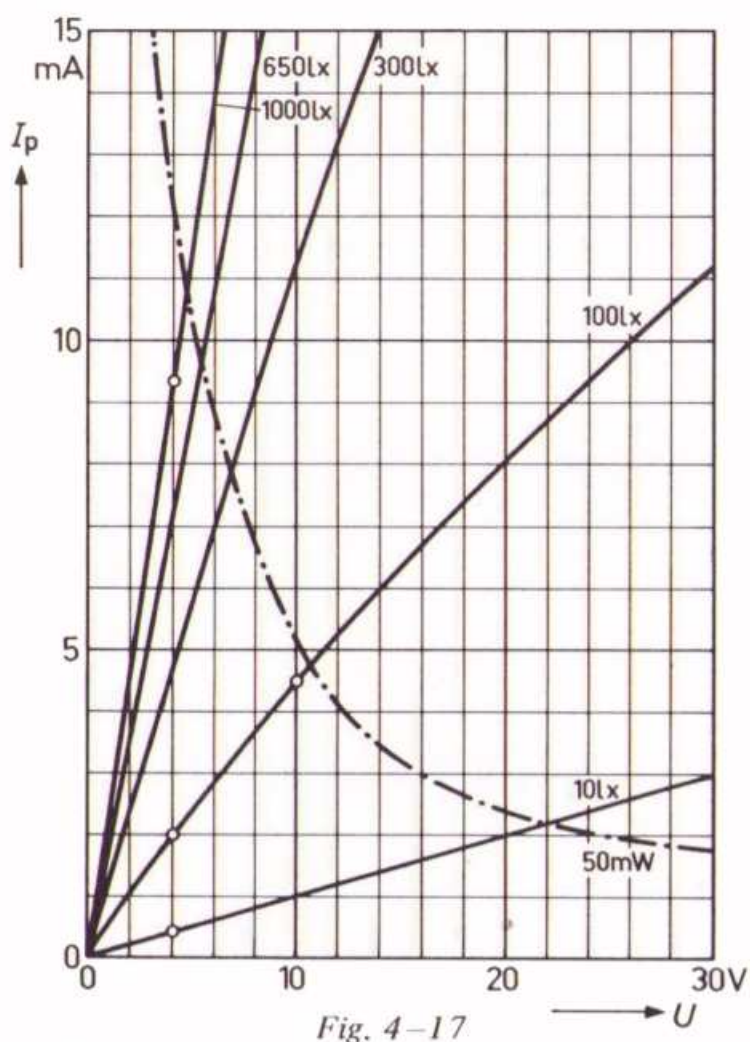


Fig. 4–16

Nu is warmte eveneens een vorm van energie, zodat dit automatisch inhoudt dat deze weerstanden ook gevoelig zijn voor temperatuurvariaties, terwijl een bepaalde maximale temperatuur niet mag worden overschreden. Dit betekent dat bij de applicatie terdege rekening moet worden gehouden met deze warmte-gevoeligheid. In fig. 4–17 is de relatie tussen de spanning over een LDR en de stroom, die als gevolg van deze spanning door de LDR vloeit, voor verschillende waarden van de verlichtingssterkte in tekening gebracht.

Het maximaal toelaatbare vermogen is in deze grafiek aangegeven door een streepstip lijn en bedraagt 50 mW. Uit de grafiek volgt dat door de LDR een stroom van 2 mA vloeit als de spanning over de LDR 4 V is en de verlichtingssterkte 100 lux bedraagt. Wordt de verlichtingssterkte opgevoerd tot 1000 lux, dan neemt de stroomsterkte bij gelijkblijvende klemspanning toe tot 9,5 mA.



4.3.1. Fabricageproces

Uitgangsmateriaal bij de fabricage is zeer zuiver cadmiumsulfide (CdS) dat, na met bepaalde stoffen te zijn verontreinigd, met een bindmiddel tot plaatjes of schijfjes wordt geperst. Na een sinterproces bij hoge temperatuur worden onder vacuüm kamvormige geleiders op het plaatje opgedampt. De tanden grijpen daarbij in elkaar zonder elkaar te raken (zie fig. 4-18). Vervolgens wordt de aldus gevormde weerstand voorzien van aansluitdraden en ondergebracht in een behuizing van plastic of metaal.

In fig. 4-19 is een dergelijke LDR afgebeeld.

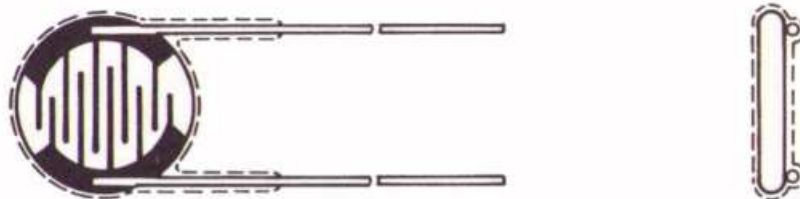


Fig. 4-18

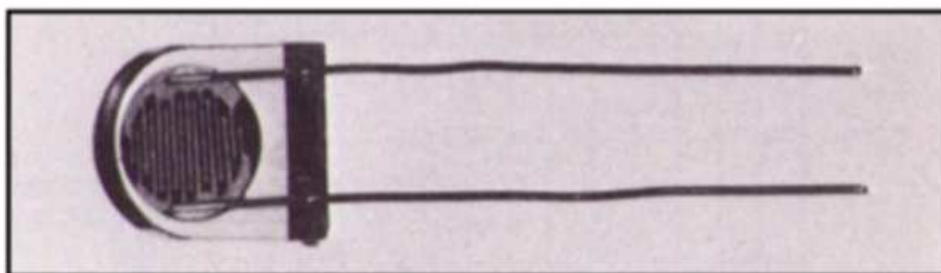


Fig. 4-19

4.3.2. Herstelwaarde

Een eigenschap die bij bepaalde toepassingen een belangrijke rol speelt, is de zgn. herstelwaarde. In de Engelse literatuur wordt deze grootheid aangeduid als recovery rate.

Wordt de verlichtingssterkte, bijv. 1000 lux, plotseling teruggebracht tot 0 lux (volledige duisternis), dan zal de weerstandswaarde niet van 200 Ω naar 10 M Ω springen. Integendeel, er verloopt enige tijd alvorens de nieuwe weerstandswaarde wordt bereikt.

Onder de herstelwaarde wordt nu de weerstandsverandering in k Ω per seconde verstaan. Genoemde grootheid ligt meestal in de orde van grootte van 200 k Ω /s.

4.3.3. Drift

De drift of het verloop in weerstandswaarde van een LDR wordt gespecificeerd als

$$D = \frac{R_{1L} - R_{0L}}{R_{0L}} \cdot 100\%$$

Hierin is:

R_{0L} de weerstandswaarde van de LDR op het moment waarop deze wordt verlicht met L lux, uitgaande van totale duisternis;

R_{1L} de weerstandswaarde t uren later. Gedurende deze tijd is de LDR steeds verlicht met L lux.

Genoemde grootheid wordt niet altijd gepubliceerd, doch kan bij bepaalde toepassingen belangrijk zijn.

4.3.4. Toepassingen

Bij de montage van een LDR dient met de volgende punten rekening te worden gehouden:

- de afstand tussen de LDR en de lichtbron, die de informatie geeft, moet zodanig worden gekozen dat de temperatuur van de LDR niet boven de 30 °C komt.
- de LDR moet zodanig worden gemonteerd dat aan het oppervlak van deze weerstand geen reflecties optreden. Dus bij voorbeeld monteren in een zwarte cilinder of zwarte doos.

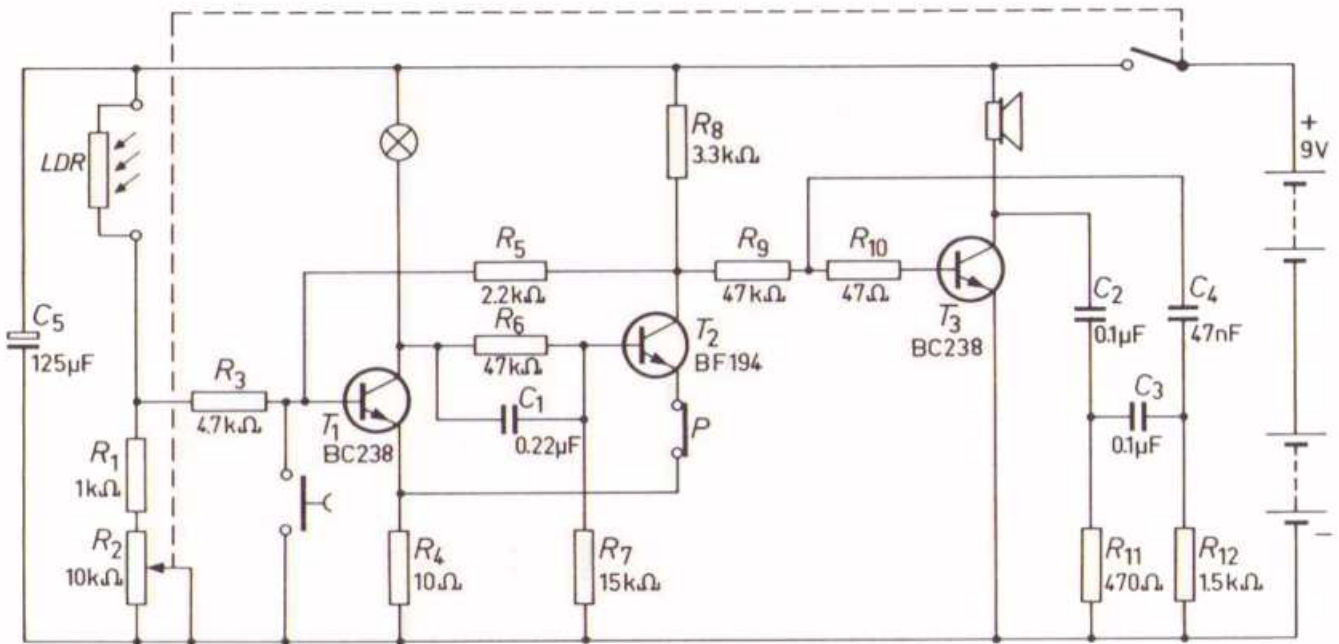


Fig. 4-20

Toepassingen van lichtgevoelige weerstanden treffen we aan op het gebied van de alarmering en signalering, alsmede de speelgoedindustrie. Fig. 4-20 toont bijv. het principe schema van een optische en akoestische alarminstallatie waarin een LDR is opgenomen.

4.4. NTC-weerstanden

NTC-weerstanden zijn onderdelen waarvan de weerstandswaarde kleiner wordt wanneer de temperatuur van de weerstand stijgt. De benaming NTC is dan ook een afkorting van „Negatieve Temperatuur Coëfficiënt”. Bij benadering wordt de relatie tussen de temperatuur van het weerstandslichaam en de weerstandswaarde weergegeven door de formule:

$$R_t = A e^{\frac{B}{T}}$$

Hierin is:

R_t de weerstand in Ω bij een temperatuur van T °K

T de temperatuur van het weerstandslichaam (°K)

e het grondtal van het natuurlijke logaritmenstelsel

A een constante die in sterke mate wordt bepaald door de afmetingen

B een constante waarvan de grootte afhankelijk is van het fabricageproces

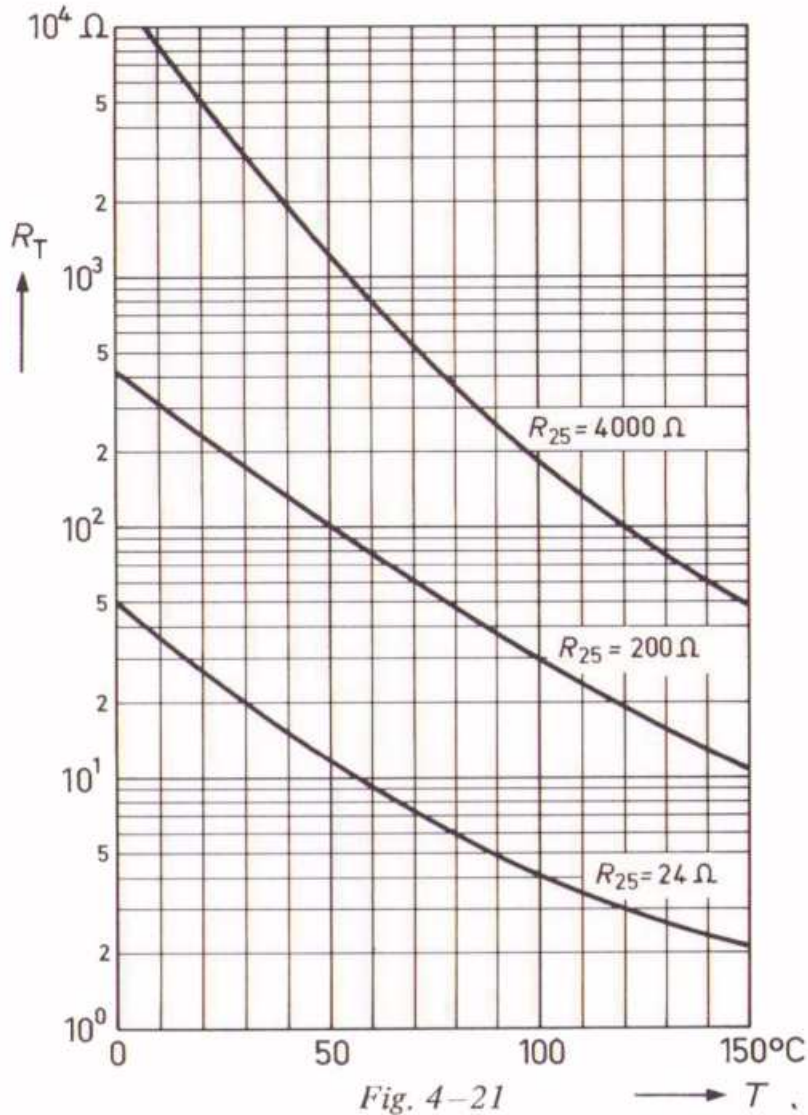


Fig. 4-21

In fig. 4-21 is van drie NTC-weerstanden de relatie tussen de weerstand (R_t) en de temperatuur (T) van het weerstandslichaam in beeld gebracht (verschillende waarden van A en B).

Uit de bovenste grafiek volgt dat de desbetreffende NTC-weerstand bij een temperatuur van 8 $^{\circ}\text{C}$ een waarde heeft van 10 000 Ω . Bij 40 $^{\circ}\text{C}$ is de weerstandswaarde gedaald tot 2000 Ω en bedraagt bij 120 $^{\circ}\text{C}$ nog slechts 100 Ω .

4.4.1. Het bepalen van B

Om de grootheid B te bepalen, worden twee metingen verricht. De eerste meting vindt plaats bij t_1 °C en de tweede bij een temperatuur van t_2 °C. Opgemerkt zij nog dat deze temperaturen betrekking hebben op het weerstandslichaam.

$$\text{Nu is } R_1 = Ae^{\frac{B}{T_1}} \text{ en } R_2 = Ae^{\frac{B}{T_2}}$$

waarbij $T_1 = 273 + t_1$ en $T_2 = 273 + t_2$).

$$\text{zodat:} \quad \frac{R_1}{R_2} = e^{\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T_2}\right)}$$

$$\text{of } \log R_1 - \log R_2 = B \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \log e$$

$$B = \frac{\log R_1 - \log R_2}{\log e} \times \frac{1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

De dimensie van B is zodoende °K. In de praktijk blijkt dat B kleine afwijkingen vertoont wanneer de temperatuur stijgt, zodat bij exacte berekeningen correcties moeten worden aangebracht. Uit het bovenstaande volgt direct dat bij de weerstandswaarde steeds de bijbehorende temperatuur moet worden vermeld. Door de fabrikant wordt gewoonlijk de weerstandswaarde bij 25 °C gepubliceerd. Om de weerstandswaarde (R_t) bij een bepaalde temperatuur (t °C) te kunnen berekenen wordt uitgegaan van de reeds eerder vermelde formule:

$$\frac{R_1}{R_2} = e^{\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T_2}\right)}$$

die dan wordt herleid tot:

$$\frac{R_{25}}{R_t} = e^{\left(\frac{B}{298} - \frac{B}{T}\right)}$$

De waarden van R_{25} en B worden door de fabrikant gepubliceerd, terwijl $T = 273 + t$. De weerstandswaarde R_t is dan te berekenen. In fig. 4—22 is een grafische voorstelling getekend, die de verhouding R_{25}/R_t als functie van de temperatuur in °C weergeeft. De grootheid B is hier de parameter.

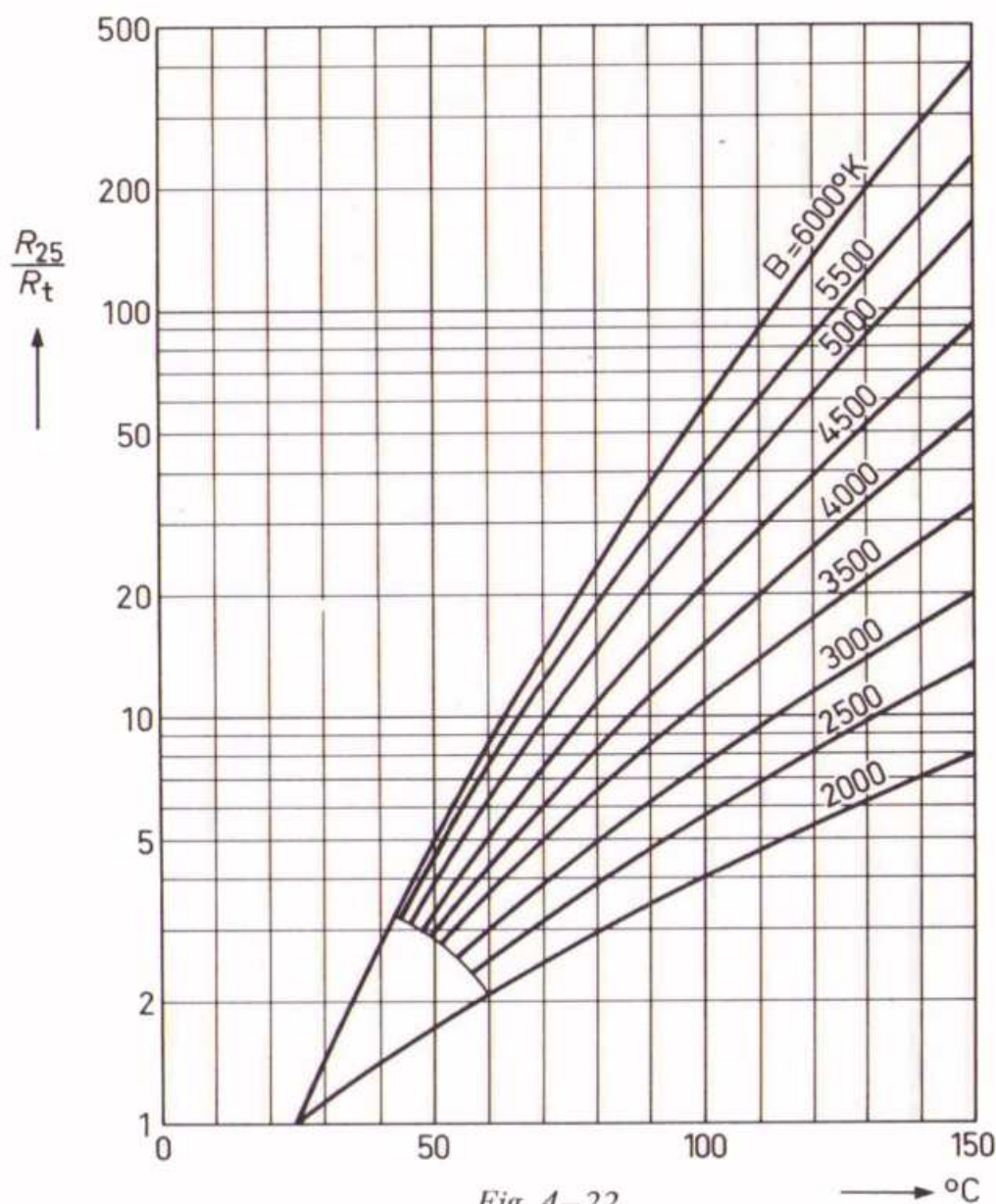


Fig. 4-22

Voorbeeld: Van een NTC-weerstand is de waarde van B gelijk aan 2000. Uit de grafiek volgt dat bij een temperatuur van 100°C de verhouding $R_{25}/R_t = 4$. Bij 100°C bedraagt de weerstandswaarde dus een kwart van de waarde bij 25°C . Als bij wijze van voorbeeld $R_{25} = 500\ \Omega$, dan is $R_{100} = 125\ \Omega$.

In fig. 4-23 is de relatie tussen de aangelegde spanning (U) en de stroom (I), die als gevolg van deze spanning door een bepaalde NTC-weerstand vloeit, in de vorm van een grafiek in beeld gebracht. Langs de horizontale as is daarbij de stroomsterkte in mA uitgezet, terwijl de aangelegde spanning in V langs de verticale as is aangegeven. Beide op logaritmische schaal. Aangenomen wordt dat de omgevingstemperatuur constant blijft.

Zolang de stroomsterkte relatief klein is, is de verwarming door het elektrisch vermogen dat in weerstand in warmte wordt omgezet te verwaarlozen. De tempera-

tuur van de NTC-weerstand is in deze toestand gelijk aan die van de omgeving. De weerstand kan onder deze omstandigheid zeer goed worden gebruikt voor het meten van de temperatuur van een bepaald object. Voor de NTC-weerstand waarop fig. 4-23 betrekking heeft, is dit het gebied waarbij de stroom varieert tussen 10^{-1} mA en 2 mA. De weerstand heeft tussen deze waarden nagenoeg een lineair karakter.

Wordt de stroomsterkte groter, dan neemt de warmte-ontwikkeling toe met als direct gevolg dat de temperatuur van de weerstand stijgt en hoger wordt dan die van de omgeving. Dit resulteert in een daling van de weerstandswaarde. In de grafiek komt dit tot uitdrukking in de kromming boven de 40°C .

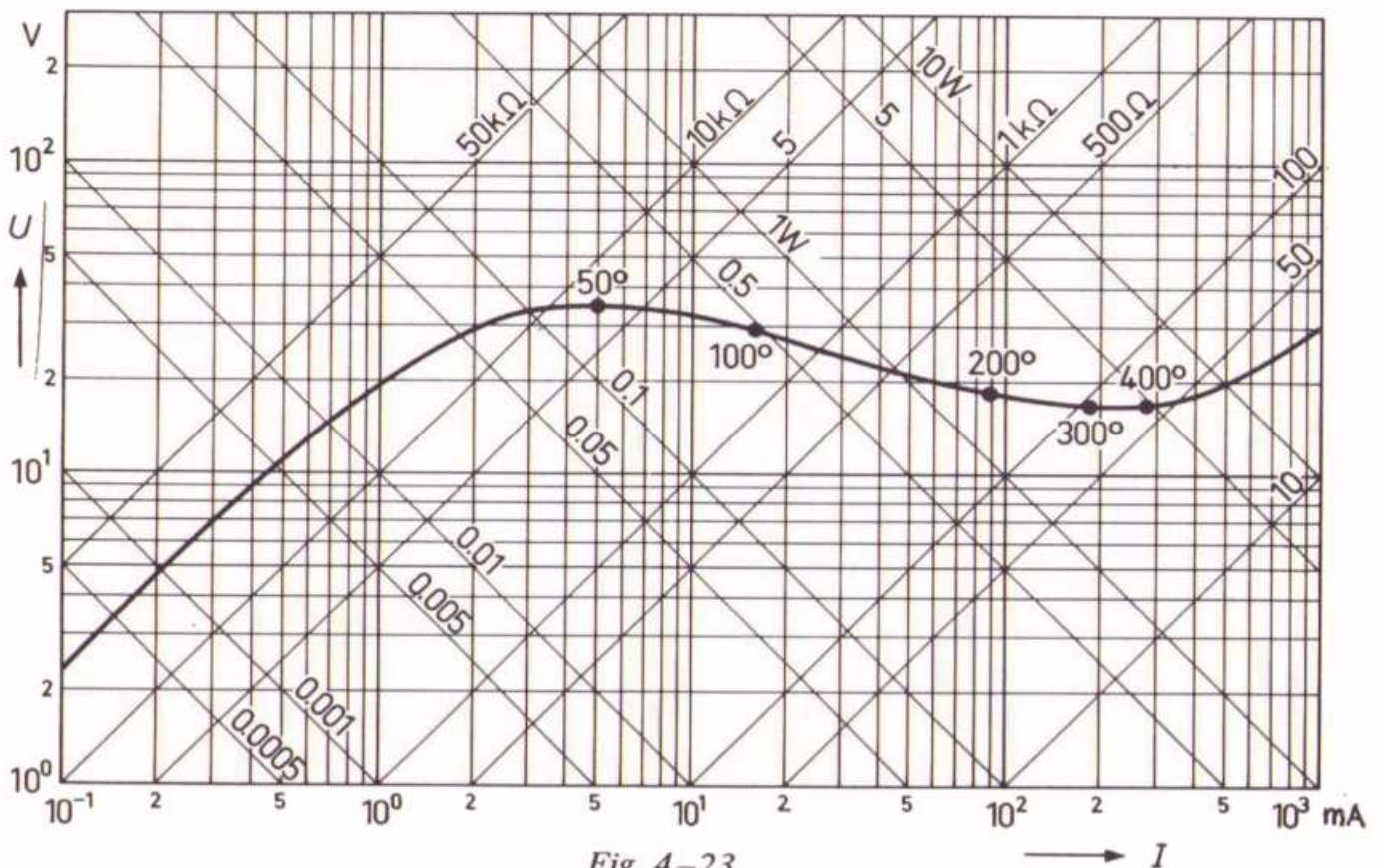


Fig. 4-23

4.4.2. Dissipatieconstante, hersteltijd

De dissipatieconstante heeft betrekking op het vermogen dat in de weerstand in warmte wordt omgezet om deze 1°C in temperatuur te doen stijgen (van 25°C tot 26°C om exact te zijn). Genoemde constante bezit de dimensie $\text{W}/^\circ\text{C}$.

De hersteltijd geeft de tijd in seconden aan waarin de weerstandswaarde bij maximale belasting terugkeert tot die bij 25°C (vooropgesteld dat geen extra koeling door convectie optreedt). In fig. 4-24 is een grafiek afgebeeld die van een bepaalde NTC-weerstand het verband aangeeft tussen de weerstandsveranderingen als gevolg van temperatuurvariaties en de tijdsduur waarin deze veranderingen optre-

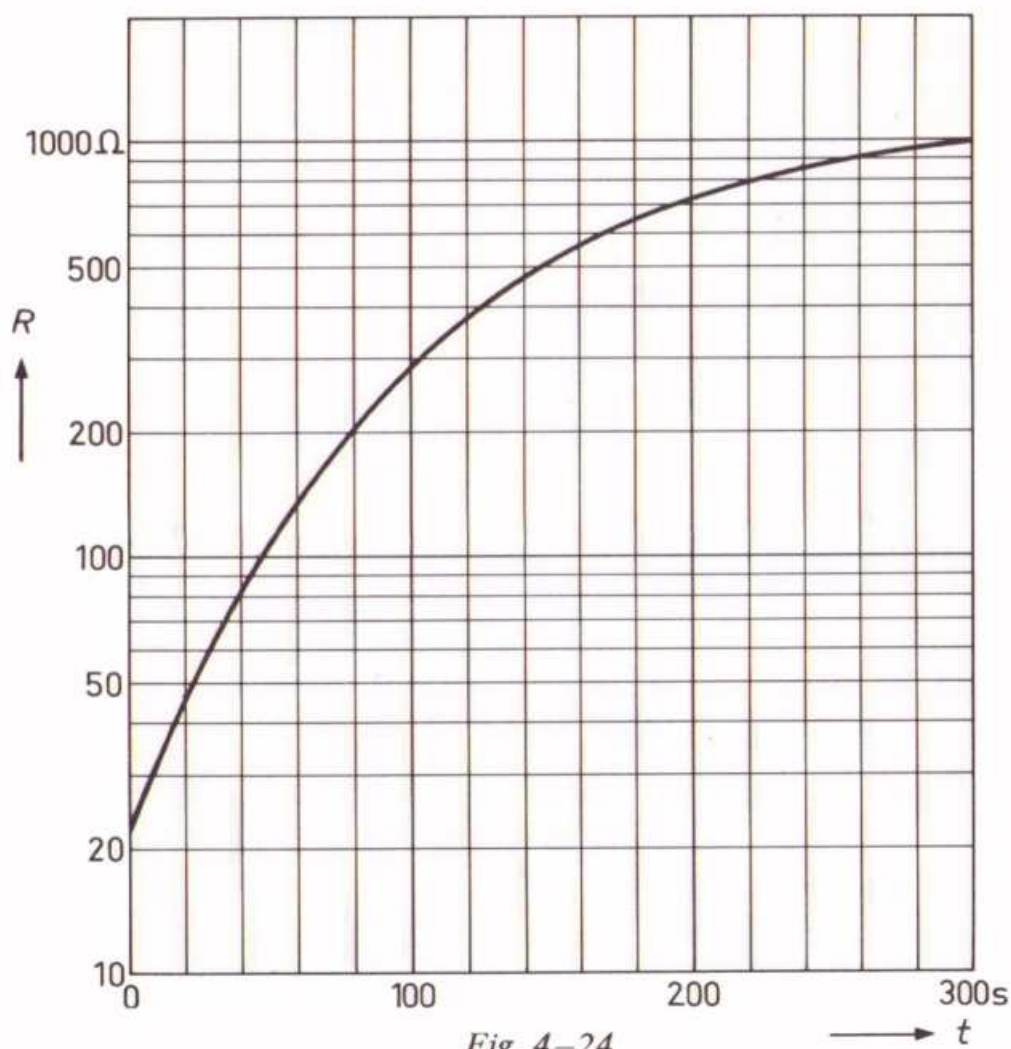


Fig. 4-24

den. De omgevingstemperatuur is daarbij constant en bedraagt 25°C . Uit fig. 4-24 blijkt dat een stijging in weerstand van $50\ \Omega$ naar $900\ \Omega$ in een tijdsbestek van ongeveer 240 seconden plaats vindt.

Bij bepaalde schakelingen zal het verloop tussen de weerstandswaarde en de temperatuur minder steil moeten verlopen dan bij de gekozen NTC-weerstand het geval is. Serie- dan wel parallelschakeling met een lineaire weerstand brengt dan veelal de oplossing van het probleem.

Uitgangsmateriaal voor de fabricage van NTC-weerstanden vormen oxyden van de zgn. ijzergroep (Fe_2O_3 ; NiO ; CoO ; enz.). Na verontreiniging en menging met een bindmiddel wordt de aldus gevormde massa in de gewenste vorm gebracht en vervolgens bij hoge temperatuur gesinterd. In fig. 4-25 zijn enkele uitvoeringen van dit soort weerstanden afgebeeld. Er zijn NTC-weerstanden met een glazen, metalen dan wel plastic omhulling, terwijl er ook uitvoeringen in de handel zijn waarbij het gesinterde weerstandslichaam is bedekt met enkele lagen isolerende lak.

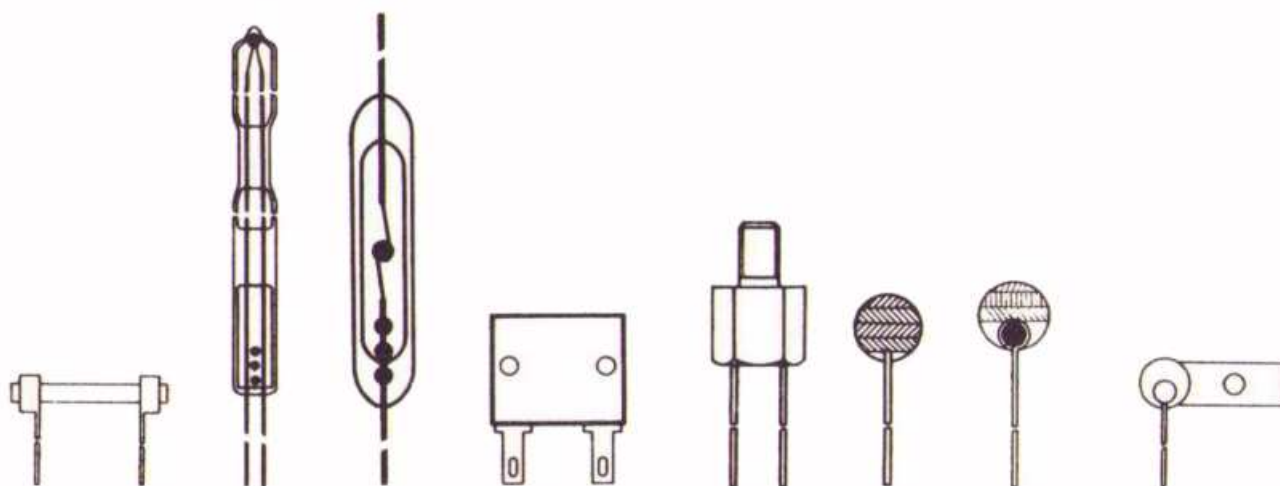


Fig. 4-25

4.4.3. Toepassingen

De meeste toepassingen van NTC-weerstanden hebben betrekking op de eigenschap dat de weerstandswaarde kleiner wordt naarmate de temperatuur van de weerstand oploopt. Een dergelijke weerstand leent zich dan ook voor:

- het meten van temperaturen,
- het signaleren en regelen van een bepaalde minimum of maximum temperatuur,
- het corrigeren van weerstand, stroom of spanningsveranderingen, die aanleiding geven tot verschillen in temperatuur.

Om de temperatuur van een bepaald object te meten wordt dit zodanig met een NTC-weerstand verbonden, dat een goed thermisch contact tussen beide wordt verkregen. De temperatuur van de NTC-weerstand is dan steeds dezelfde als die van het object. De weerstand wordt nu in een elektronische keten opgenomen, waarbij rekening moet worden gehouden met het elektrisch vermogen dat in de weerstand in warmte wordt omgezet. Genoemd vermogen moet zo gering zijn dat de ontwikkelde warmte van geen invloed is op de temperatuur van de NTC weerstand.

Bij de in groep twee verzamelde toepassingen stuurt de NTC-weerstand een bepaald elektronisch proces. Een typisch voorbeeld is de brandalarm- en sprinkler installatie die is afgebeeld in fig. 4-26. In de beveiligde ruimte zijn hier een aantal NTC-weerstanden aangebracht, die parallel aan elkaar zijn geschakeld. Bij kamertemperatuur zijn ze hoogohmig, zodat over R2 slechts een geringe spanning aanwezig is. Wordt nu een van de NTC-weerstanden verhit, dan daalt de weerstandswaarde met als direct gevolg dat de spanning over R2 toeneemt en de installatie op een gegeven ogenblik in werking treedt.

Andere toepassingen hebben betrekking op het regelen van de temperatuur in koelkasten en wasmachines.

Een schakeling die soms wordt toegepast voor het stabiliseren van de deelspan-

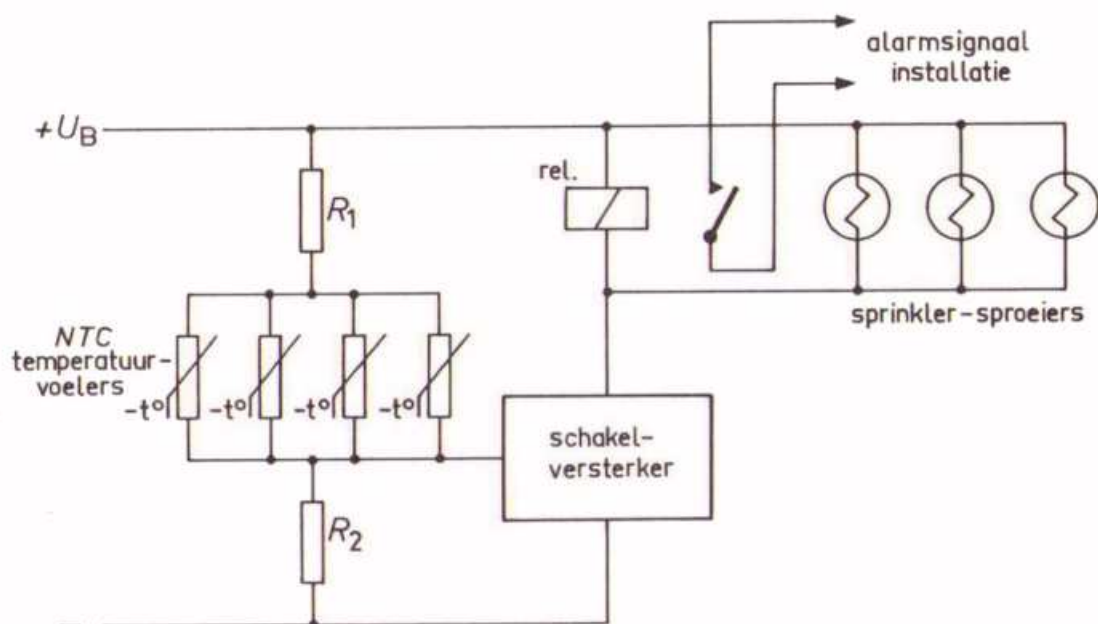


Fig. 4-26

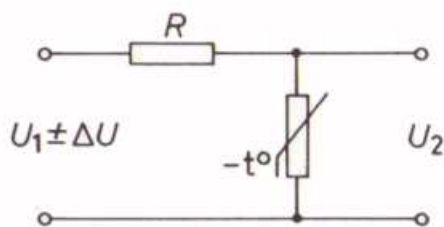


Fig. 4-27

ningen in transistorschakelingen is afgebeeld in fig. 4-27. Het geheel bestaat uit een serieschakeling van een lineaire weerstand en een NTC-weerstand. Stijgt de spanning U_1 en daarmee de stroom door de serieschakeling, dan resulteert dit in een daling van de weerstandswaarde van de NTC-weerstand, waardoor de spanning U_2 over een bepaald gebied constant kan worden gehouden.

4.5. PTC-weerstanden

De aanduiding PTC wil zeggen dat de temperatuurcoëfficiënt van deze weerstanden positief is, m.a.w. de weerstand neemt toe als de temperatuur oploopt. In fig. 4-28 is een grafiek afgebeeld, die de relatie weergeeft tussen de weerstandswaarde (R) en de temperatuur van het weerstandslichaam (T). Uit deze grafiek blijkt dat genoemde relatie verre van lineair is en niet in de vorm van een eenvoudige formule kan worden vastgelegd. Bij de desbetreffende PTC-weerstand is de temperatuurcoëfficiënt bij temperaturen lager dan 90°C en hoger dan 160°C zelfs negatief. Voor technische toepassingen komt echter alleen het gebied met de zeer grote positieve temperatuurcoëfficiënt in aanmerking. In fig. 4-28 is dit het gebied tussen $R_{\min}$ en $R_{\max}$. Een stijging in temperatuur van 90°C tot 160°C resul-

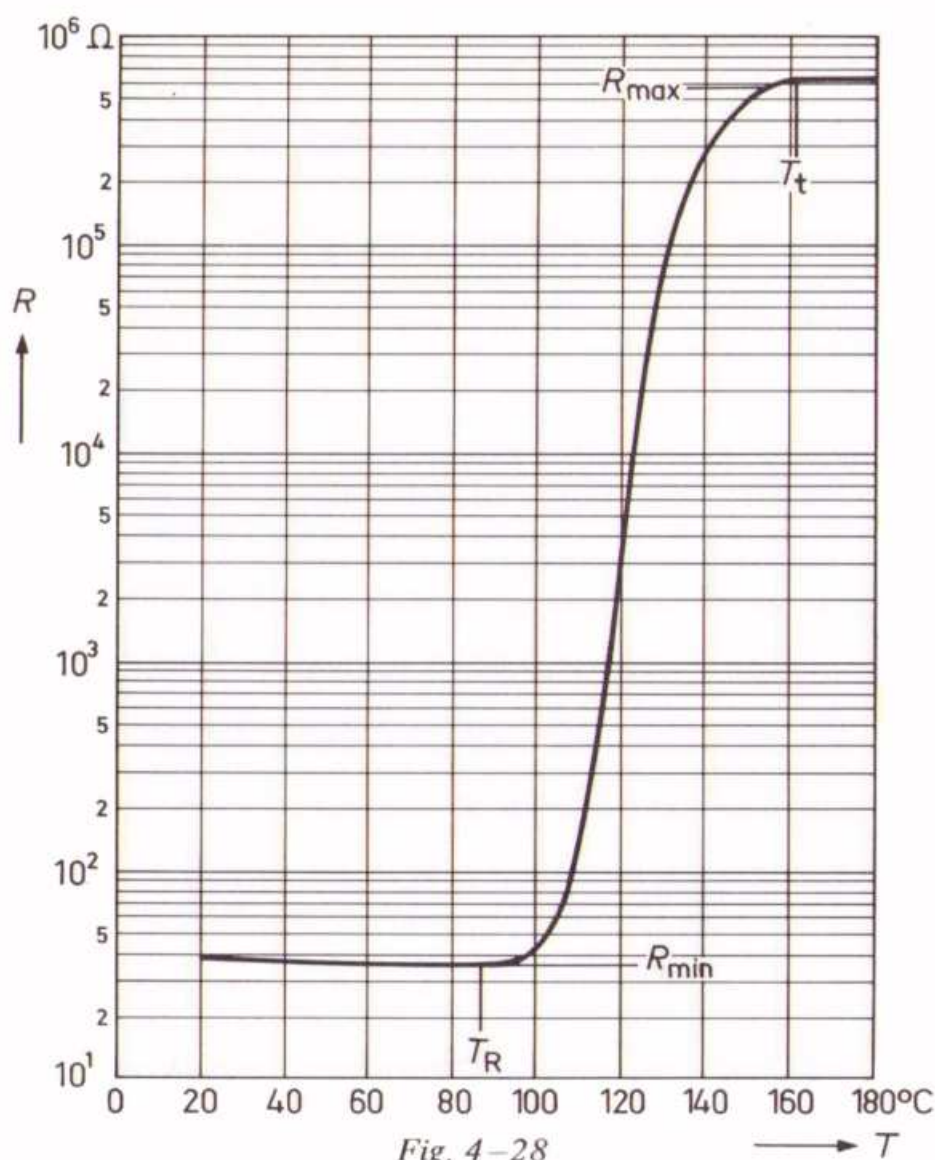
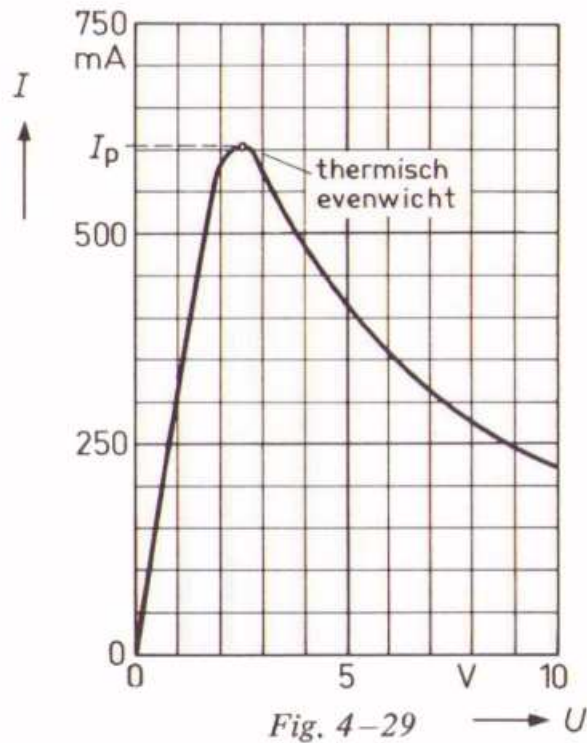


Fig. 4-28

teert hier in een weerstandstoename van maar liefst 600 000 Ω . (Bij 90 °C is de weerstand 35 Ω en bij 160 °C bedraagt de weerstand 600 000 Ω).

Dit betekent dat een PTC-weerstand in staat is om een stroomketen te onderbreken als de temperatuur een bepaalde waarde overschrijdt. Een dergelijke weerstand leent zich dan ook bij uitstek voor het beveiligen van elektronische onderdelen en het stabiliseren van de temperatuur van bepaalde apparaten. Typische voorbeelden van dit laatste zijn haarkrultangen en soldeerbouten.

In fig. 4-29 is de stroom/spanningskarakteristiek van een PTC-weerstand op lineaire schaal afgebeeld. Uit deze grafiek volgt dat de stroom nagenoeg recht evenredig met de spanning toeneemt tot de maximale waarde I_p is bereikt. Met het toenemen van de stroom is de temperatuur van het weerstandslichaam eveneens opgelopen en heeft bij I_p de temperatuur bereikt waarbij de weerstand zeer sterk toeneemt ($R_{\min}$ in fig. 4-28). Het directe gevolg hiervan is een daling van de stroom door de PTC-weerstand, dit ondanks het feit dat de spanning over de PTC steeds groter wordt.



Indien de stroom oploopt tot de waarde I_p en daarna niet meer verandert, betekent dit dat bij deze stroomsterkte de temperatuur van het weerstandslichaam constant blijft. Dit laatste houdt in, dat bij I_p dan de hoeveelheid elektrische energie die per tijdseenheid in warmte wordt omgezet, gelijk is aan de hoeveelheid warmte die per tijdseenheid naar de omgeving wegvloeit, zodat:

ontwikkelde warmte per sec. = afgevoerde warmte per sec.

$$I_p^2 \cdot R_p = D (T_p - T_{omg})$$

of

$$I_p = \sqrt{\frac{D (T_p - T_{omg})}{R_p}}$$

$$[I_p \dots (\text{A}); D \dots (\frac{\text{W}}{^\circ\text{C}}); T \dots (^\circ\text{C}); R_p \dots (\Omega)]$$

Hierin is:

- I_p de stroomsterkte in de PTC-weerstand;
- T_p de temperatuur van het weerstandslichaam op het moment waarop de stroomsterkte I_p is;
- T_{omg} de omgevingstemperatuur in $^\circ\text{C}$;
- R_p de weerstandswaarde in ohm op het ogenblik waarop de stroomsterkte I_p is;
- D de dissipatieconstante.

Dit laatste is het vermogen dat nodig is om het weerstandslichaam 1°C in temperatuur te doen stijgen. (Aangenomen wordt hierbij dat de omgevingstemperatuur 25°C bedraagt en geen extra koeling wordt toegepast.)

Met behulp van het bovenstaande is het mogelijk om I_p uit de R/T -grafiek af te leiden. In fig. 4–30 is daartoe een dergelijke grafiek nogmaals afgebeeld. Gevraagd wordt om I_p te bepalen.

Als omgevingstemperatuur wordt 25°C gekozen, terwijl verder nog is gegeven dat de dissipatieconstante (D) $20\text{ mW}/^\circ\text{C}$ bedraagt. Op de horizontale (T) as wordt nu de omgevingstemperatuur T_{omg} uitgezet. Vanuit dit punt wordt een raaklijn getrokken aan de R/T -grafiek van de betreffende PTC-weerstand. Het raakpunt heeft in fig. 4–30 als coördinaten: $T = 70^\circ\text{C}$ en $R = 90\ \Omega$.

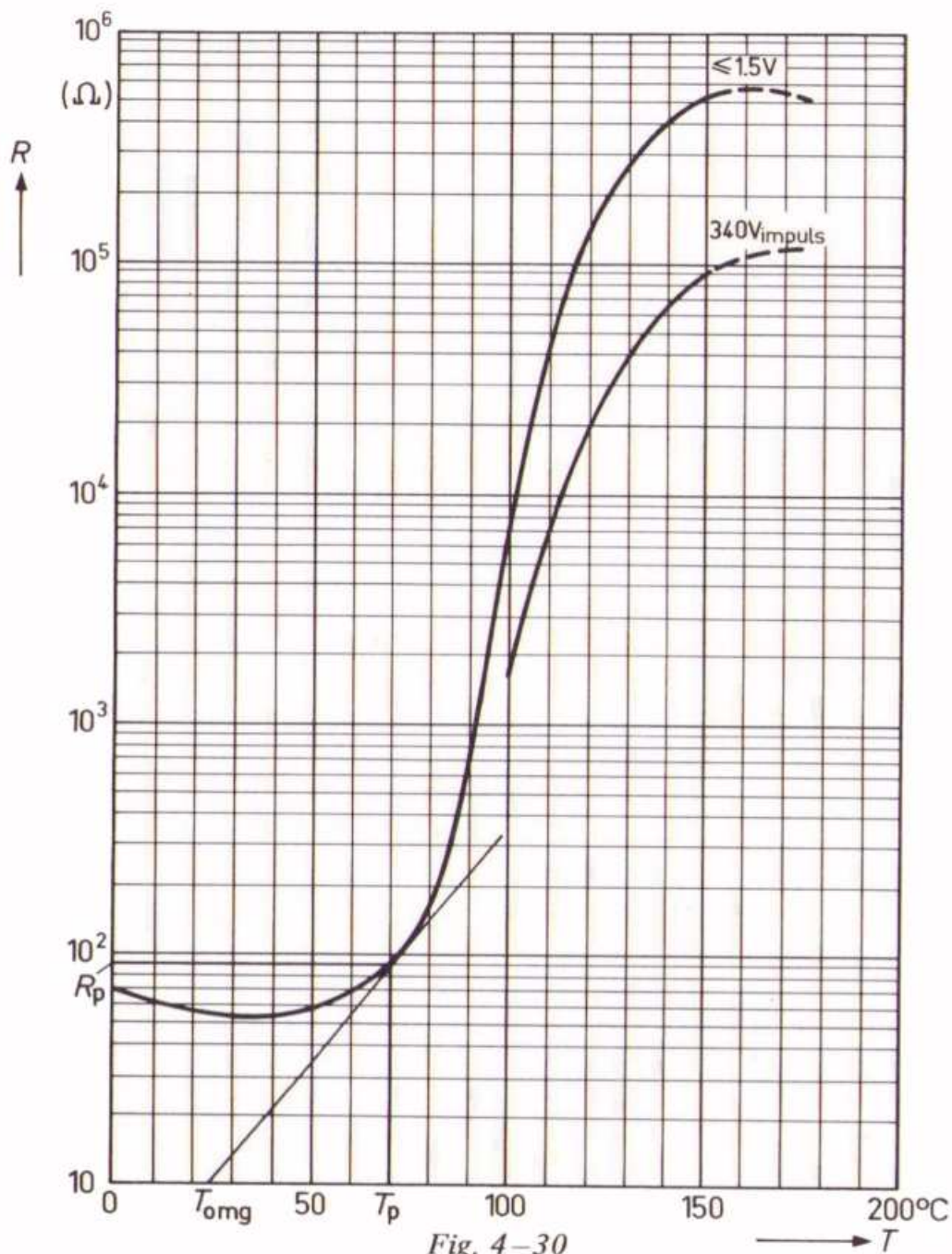
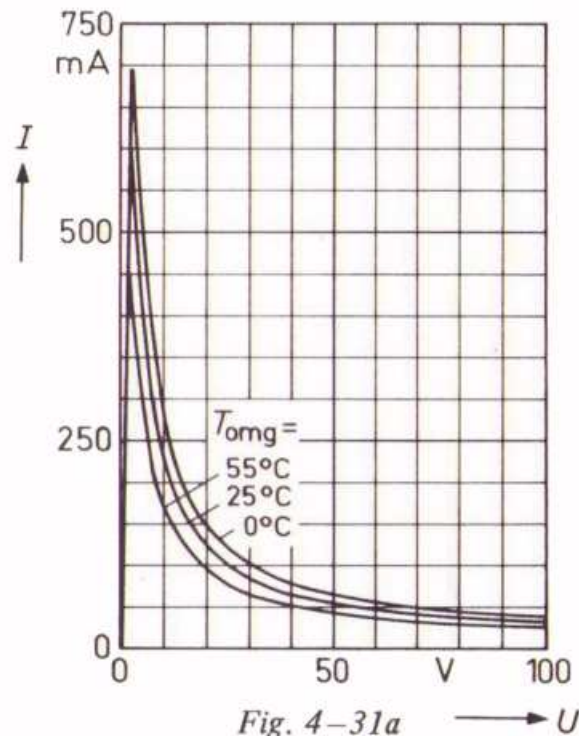


Fig. 4–30

Bij 70 °C bedraagt de weerstand dus 90 Ω. Een verdere stijging in temperatuur resulteert in een sterke toename van de weerstand. Genoemde waarden, ingevuld in de eerder vermelde formule levert:

$$I_p = \sqrt{\frac{20 \times 10^{-3} (70 - 25)}{90}}$$

Zodat $I_p = 100$ mA.



In fig. 4–31a is nogmaals een stroom/spanningskarakteristiek van een PTC-weerstand afgebeeld, echter nu bij drie verschillende waarden van de omgevingstemperatuur. Uit deze grafieken blijkt, dat naarmate de omgevingstemperatuur hoger is, het gebied met sterk toenemende weerstand eerder wordt bereikt. De koeling van de PTC-weerstand en dus ook de plaats en manier van monteren kunnen bij bepaalde schakelingen uiterst belangrijk zijn.

4.5.1. Serieschakeling van PTC en lineaire weerstand

Nadat in het voorgaande de eigenschappen van de PTC-weerstand zijn uiteengezet, wordt thans het gedrag van een serieschakeling bestaande uit een PTC-weerstand en een lineaire weerstand nagegaan. In fig. 4–31b is daartoe de stroom/spanningskarakteristiek van een PTC-weerstand afgebeeld. Zowel de stroom door de weerstand, als de spanning over de weerstand zijn hierin op lineaire schaal uitgezet. Het gedrag van de lineaire weerstand wordt in de grafiek weergegeven door de rechte lijn R , gaande door de punten U_a (de spanning over de serieschakeling

als er geen stroom door de keten vloeit) en I_m (de stroom in de keten bij kortgesloten PTC-weerstand). In het algemeen snijden de grafieken van PTC- en lineaire weerstand elkaar op drie plaatsen. De snijpunten P_1 en P_2 zijn daarbij stabiele toestanden, dit in tegenstelling tot het snijpunt P_3 . Bij P_1 gedraagt de serieschakeling zich als een lage weerstand, terwijl de instelling P_2 zich manifesteert als een zeer grote weerstand.

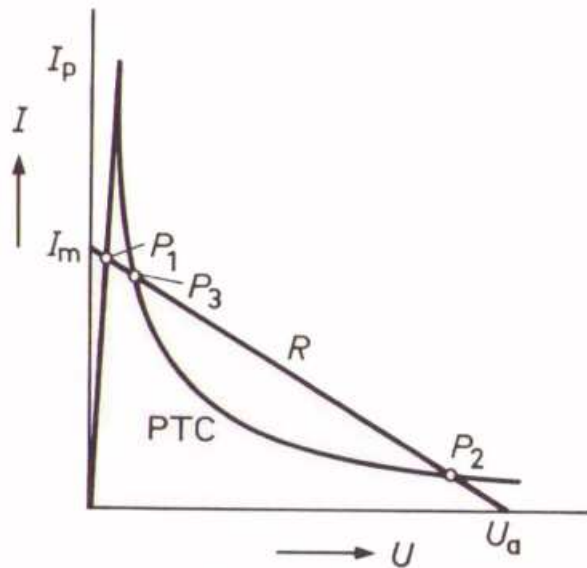


Fig. 4-31b

Wordt een spanning op de serieschakeling aangesloten, dan zal het geheel zich instellen op het werkpunt P_1 , dus het werkpunt met de grootste stroom. Het werkpunt P_2 kan alleen worden bereikt door:

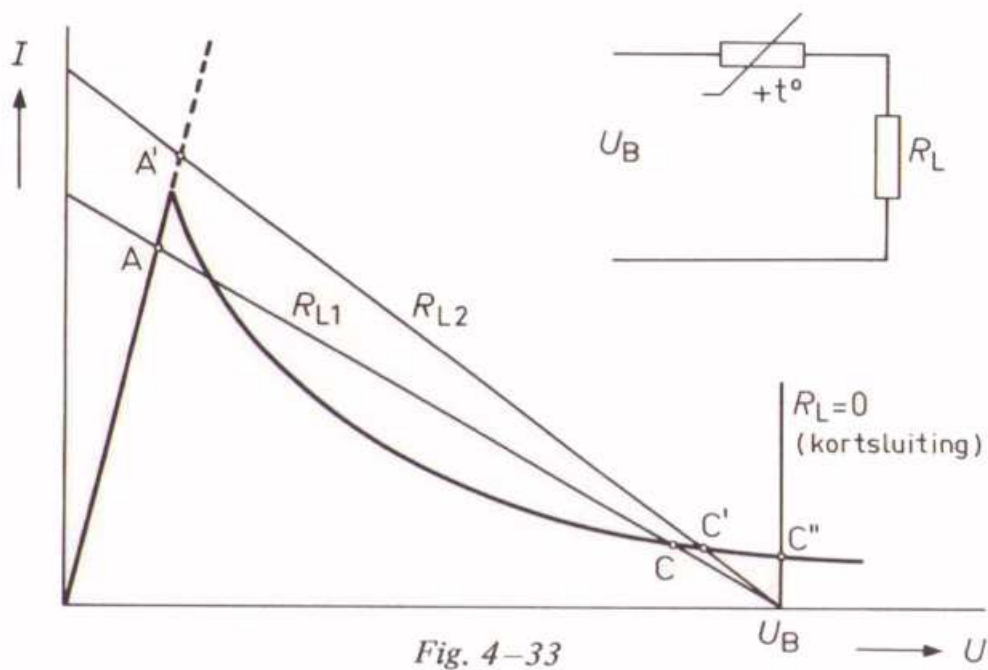
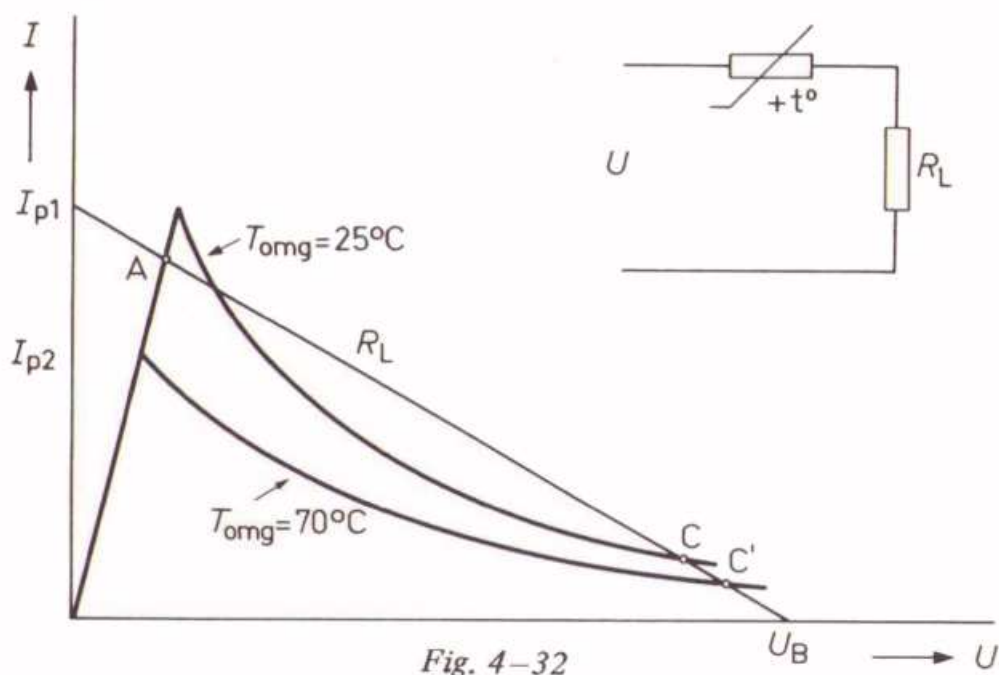
1. de spanning over de serieschakeling te verhogen
2. de omgevingstemperatuur op te voeren
3. de waarde van de lineaire serieweerstand te verkleinen.

Door deze typische eigenschap leent genoemde serieschakeling zich voor verschillende doeleinden.

1. Temperatuurgevoelige schakelaar

Bij de serieschakeling afgebeeld in fig. 4-32 zijn de waarden van de PTC- en de lineaire weerstand zodanig gekozen, dat de PTC-karakteristiek bij een omgevingstemperatuur van 25°C op drie plaatsen wordt gesneden door de karakteristiek van de lineaire weerstand. Dit betekent dat de serieschakeling bij het inschakelen een geringe weerstand vertegenwoordigt. Instelpunt A

Wordt het weerstandslichaam nu door de omgeving, dus van buitenaf, verwarmd tot bijv. 70°C , dan daalt de maximale stroom van I_{p1} tot I_{p2} , omdat de weerstand van de PTC sterk toeneemt. Dit betekent dat de karakteristieken van beide weerstanden elkaar nu nog maar in één punt (C') snijden. De serieschakeling gedraagt zich nu als een zeer grote weerstand, zodat de oorspronkelijke stroomketen wordt onderbroken. De grootte van de spanning over de serieschakeling speelt daarbij geen rol. Koelt de PTC-weerstand vervolgens af, zodat de oorspronkelijke



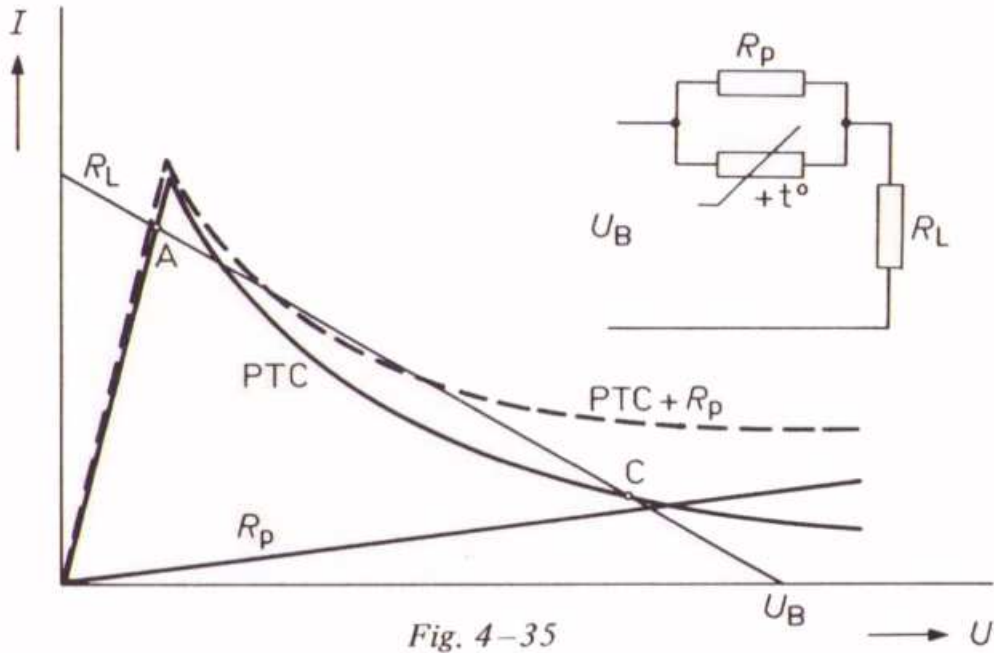
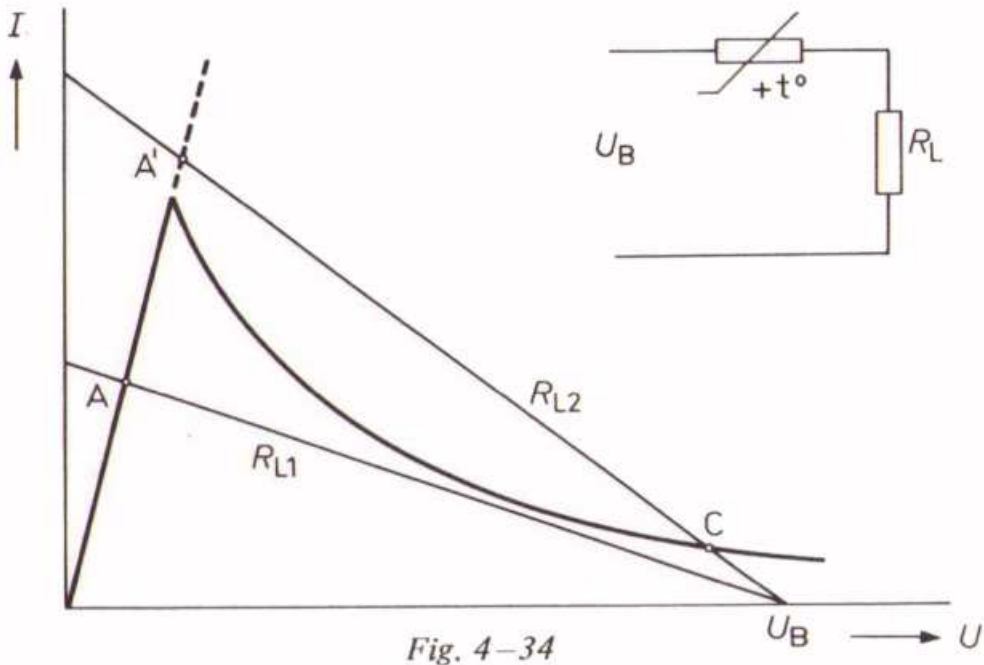
temperatuur (in dit geval 25°C) terugkeert, dan blijft de serieschakeling zich toch als een hoge weerstand gedragen. Het instelpunt C' verschuift alleen naar C (zie fig. 4-32).

2. Stroomgevoelige schakelaar

In fig. 4-33 is nogmaals een serieschakeling van een PTC- en een lineaire weerstand afgebeeld. De lineaire weerstand wordt nu echter steeds kleiner, zodat de stroom door de schakeling toeneemt. Als de lineaire weerstand de waarde R_{L1} heeft bereikt, geeft het punt A gelegen op de I/U karakteristiek van de PTC-weer-

stand de instelling weer. Deze is laagohmig. Wordt de lineaire weerstand nog kleiner, dan stijgt de stroom nog meer met als gevolg dat de temperatuur van het weerstandslichaam oploopt. Dit laatste betekent dat de weerstand van de PTC-weerstand nu vrij plotseling veel groter wordt. Het werkpunt verplaatst zich daarbij van A via A' naar C'. De instelling A' treedt slechts gedurende korte tijd op, omdat het weerstandslichaam snel warm wordt. (Het instelpunt C'' geeft de instelling weer bij een totale kortsluiting van de lineaire weerstand.)

Daalt de stroomsterkte in de serieschakeling doordat bijv. de lineaire weerstand weer toeneemt, dan blijft de schakeling toch hoogohmig, m.a.w. de uitgangstoestand keert vanzelf niet terug. Een geheel andere situatie doet zich voor als de karakteristieken van PTC- en lineaire weerstand elkaar slechts in één punt snijden.



Dus zoals bijv. afgebeeld in fig. 4–34. Het snijpunt van beide grafieken (A in genoemde figuur) geeft aan dat de weerstand van de serieschakeling laag is, m.a.w. de schakeling geleidt. Wordt de lineaire weerstand kleiner, dan neemt de stroom in de keten toe, zodat het punt A zich langs de PTC-grafiek verplaatst en na een bepaald ogenblik A' bereikt. De stroom is nu zodanig opgelopen dat het weerstandslichaam de temperatuur bereikt waarop de weerstand van de PTC zeer sterk toeneemt. Het tijdelijke instelpunt A' springt nu naar C. Dit betekent dat de serieschakeling vrij plotseling hoogohmig wordt, waardoor de stroom door deze schakeling wordt geblokkeerd.

Afwijkend t.o.v. het voorgaande is nu, dat de keten weer gaat geleiden als het weerstandslichaam van de PTC voldoende is afgekoeld. Na afkoeling keert de oorspronkelijke laagohmige toestand (Instelpunt A) weer terug.

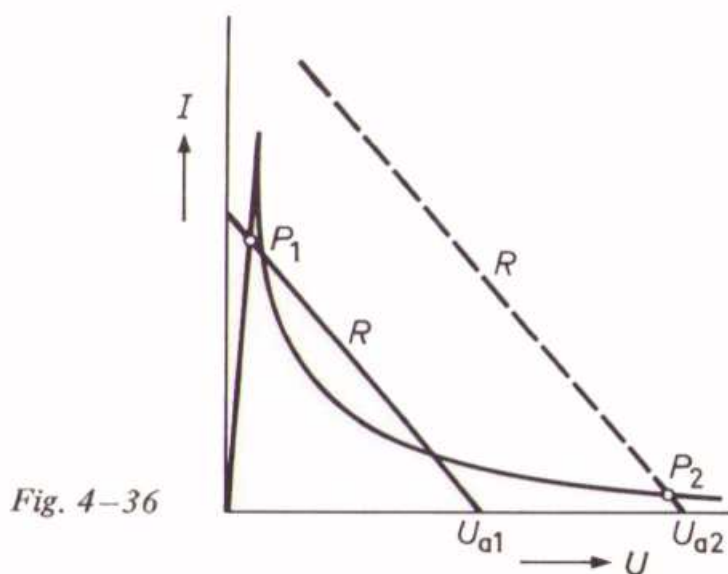
Het bovenstaande kan op twee manieren worden bereikt, nl.:

1. De grootte van de lineaire weerstand R_{L1} zodanig te kiezen t.o.v. de PTC-weerstand dat beide karakteristieken elkaar slechts in één punt snijden (zie fig. 4–34).
2. Door de karakteristiek van de PTC-weerstand bij hogere temperaturen iets „omhoog” te brengen door er een lineaire weerstand aan parallel te schakelen (zie fig. 4–35).

Bovengenoemde serieschakeling fungeert zodoende als een soort schakelaar die de keten onderbreekt als de stroom te groot wordt, doch de keten weer sluit als de oorspronkelijke stroomsterkte weer terugkeert en het weerstandslichaam is afgekoeld.

3. Spanningsbeveiliging

In fig. 4–36 is de situatie afgebeeld waarbij de temperatuur van het weerstandslichaam en de stroom door de PTC niet veranderen. De spanning neemt daarentegen plotseling sterk toe. Dit laatste komt in de grafiek tot uitdrukking door het naar rechts schuiven van de grafiek van de lineaire weerstand. In fig. 4–36 is de spanning over de schakeling opgelopen van U_{a1} tot U_{a2} volt. Dit betekent dat beide grafieken elkaar nu nog slechts in één punt (P2) snijden, m.a.w. de schakeling heeft een hoogohmig karakter gekregen. Eventueel aanwezige andere onderdelen worden zodoende beschermd tegen overbelasting.



4.5.2. Samenstelling en uitvoering

De voornaamste grondstoffen van dit soort weerstanden zijn bariumcarbonaat, strontiumoxyde en titaanoxyde, die na te zijn gemalen, gedoseerd en gemengd, worden geperst tot schijfjes, plaatjes of buisjes. De aldus verkregen weerstanden worden vervolgens gesinterd bij temperaturen variërend van 1000 °C tot 1400 °C. Hierna worden de aansluitingen aangebracht en het geheel voorzien van enkele lagen beschermende lak.

De belangrijkste uitvoeringen zijn:

- A. Zonder omhulling en aansluitdraden met gemetalliseerde zijkanten.
- B. Zonder omhulling met radiale aansluitdraden, gelakt echter zonder isolatie.
- C. Met kunststofomhulling + radiale aansluitdraden.
- D. In glazen behuizing met twee aansluitdraden.

4.6. Mechanisch gevoelige weerstanden

Ook mechanische krachten kunnen de weerstandswaarde onder bepaalde omstandigheden beïnvloeden. Wordt bijv. een weerstandsdraad uitgerekt, dan wordt deze draad langer en tegelijk dunner, zodat de weerstandswaarde groter wordt. De mechanica leert dat zolang de elasticiteitsgrens niet wordt overschreden, de draad terugkeert in zijn oorspronkelijke toestand, als de desbetreffende kracht verdwijnt (Wet van Hooke). Dit laatste betekent dat ook de weerstandswaarde weer terugkeert tot de oorspronkelijke waarde. Hetzelfde geldt wanneer de draad wordt gestuikt. In dat geval wordt de lengte kleiner, terwijl de doorsnede groter wordt. Het directe gevolg hiervan is een daling van de weerstandswaarde.

Op dit principe van weerstandsverandering berust een uitgebreid specialistisch gebied van de elektronische meettechniek. Als opnemers worden zgn. rekstrookjes gebruikt. Dit zijn weerstandselementjes voor het meten van kleine mechanische lengteveranderingen als gevolg van het optreden van druk, buiging of torsie. In fig. 4-37 is het principe van een rekstrookje afgebeeld. Zo'n rekstrookje bestaat uit weerstandsdraad dat op een plaatje van isolatiemateriaal is aangebracht. Als weerstandsmateriaal wordt daarbij veelal constantaan gebruikt. De speciale wikkellijze (meandervormige lussen) is bedoeld om de draadlengte zo groot mogelijk te maken en daardoor de verhouding:

lengteverandering/weerstandsverandering zo klein mogelijk te houden.

Het strookje, afgebeeld in fig. 4-37 is echter alleen gevoelig voor lengteveranderingen (krachten) die in één bepaalde richting optreden. Door nu twee draadwindingen loodrecht op elkaar aan te brengen, kunnen lengteveranderingen worden gemeten, die in verschillende richtingen werkzaam zijn. Om selectiever te werken zijn rekstrookjes met meer windingen ontwikkeld, die dan onder bepaalde hoeken t.o.v. elkaar zijn opgesteld (zie fig. 4-38).

Metaalfilmrekstrookjes bestaan niet uit weerstandsdraad, doch uit folie van weer-

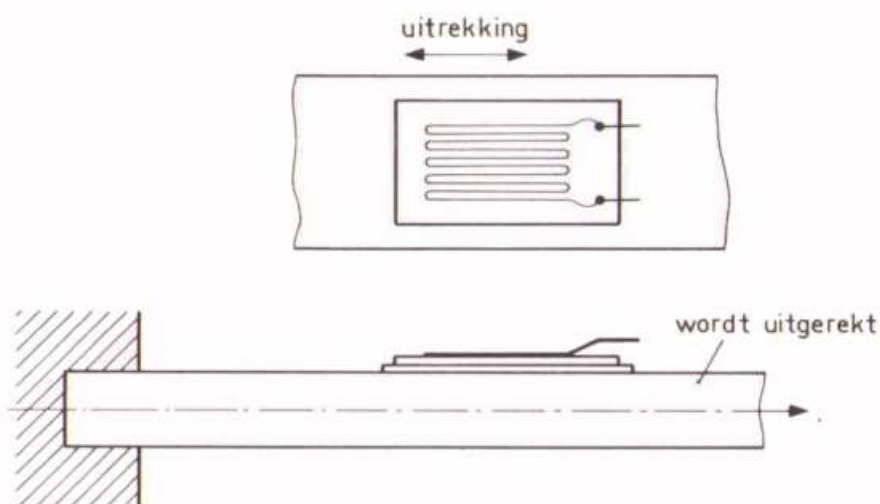


Fig. 4–37. Rekstrookje is onwrikbaar vastgezet op te beproeven voorwerp.

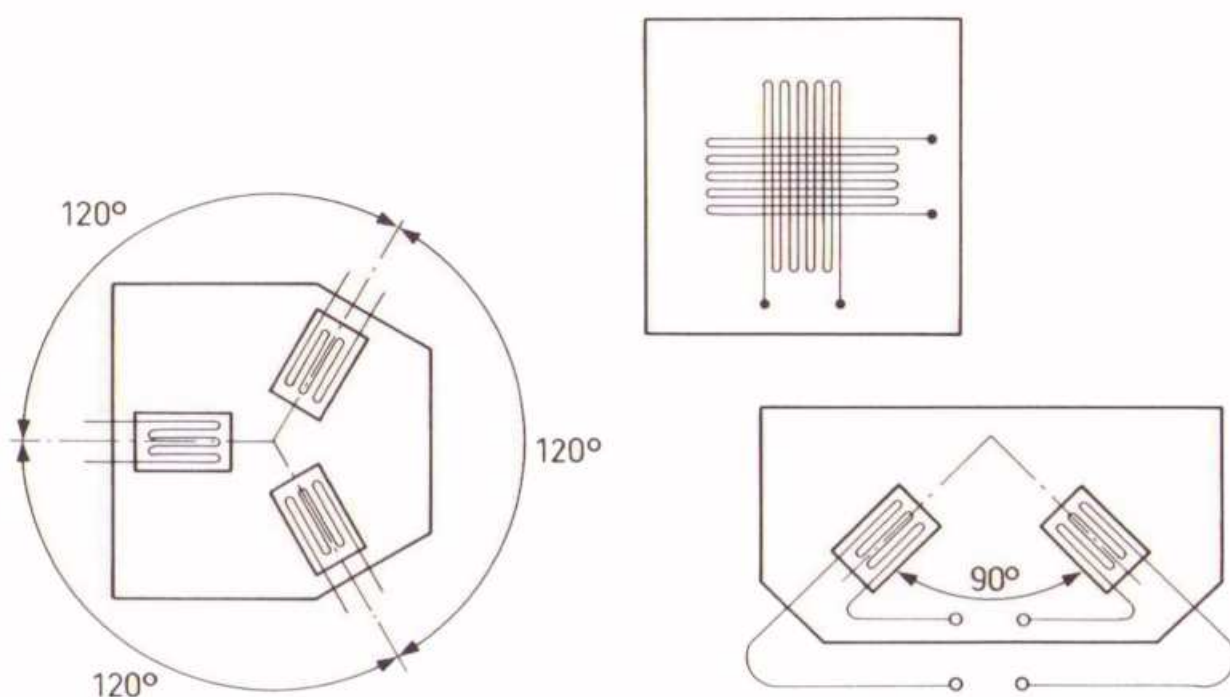


Fig. 4–38. Rekstrookjes gerangschikt onder verschillende hoeken.

standsmateriaal, waarbij de vorm van de winding als een gedrukte bedrading is uitgevoerd. De werking is echter dezelfde als die van de rekstrookjes met weerstandsdraad. Er zijn tegenwoordig ook dunne siliciumstaafjes op de markt, die als uitzettingsopnemer fungeren en ongeveer 50 X gevoeliger zijn dan de normale plaatjes met weerstandsdraad. Dit laatste vereenvoudigt de vereiste meetapparatuur, doch daar tegenover staat dat silicium tamelijk temperatuurgevoelig is. De desbetreffende metingen dienen dan ook snel te worden uitgevoerd wanneer sprake is van temperatuursveranderingen.

Rekstroomkjes worden geleverd met nominale waarden die variëren tussen $60\ \Omega$ en $600\ \Omega$. De bij belasting optredende weerstandsveranderingen zijn in de orde van grootte van enkele milli-ohm. Deze geringe veranderingen kunnen alleen met behulp van brugschakelingen worden gemeten. Een dergelijke brug wordt meestal gevoed met een wisselspanning waarvan de frequentie $2 \dots 6\ \text{kHz}$ bedraagt, omdat de desbetreffende spanningsvariaties vaak zeer klein zijn en versterkt moeten worden om ze meetbaar te maken. In fig. 4-39 is het principe van een dergelijke rekstroomkjes-meetbrug afgebeeld.

In fig. 4-40 is een krachtopnemer afgebeeld, zoals die wordt gebruikt in weegbruggen. Bij belasting wordt de kolom korter en dikker, dit betekent dat de rekstroomkjes DM2 en DM4 worden uitgerekt en de rekstroomkjes DM1 en DM3 worden gestuikt. De brug wordt hierdoor nog eens extra verstemd en is hierdoor tevens ongevoelig voor temperatuursvariaties als alle vier de rekstroomkjes gelijk zijn.

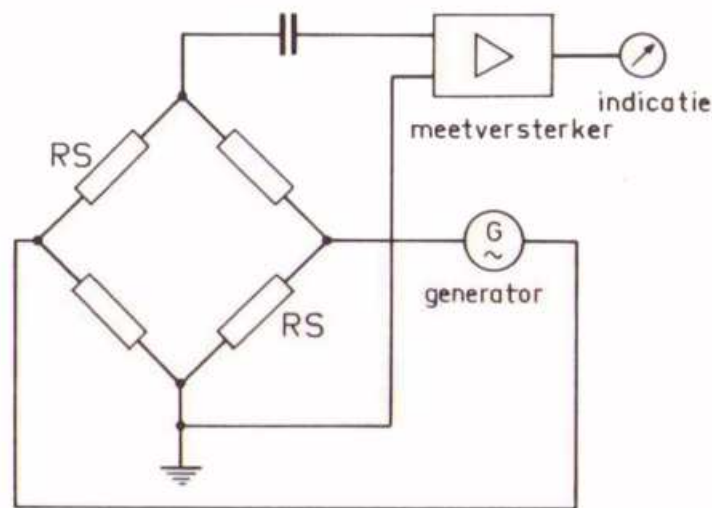


Fig. 4-39

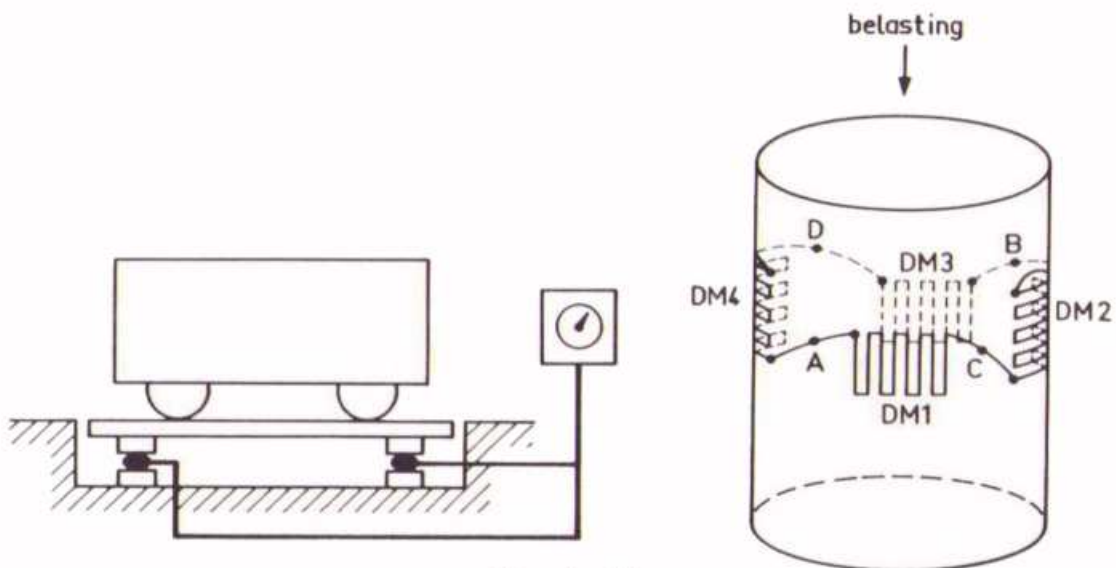


Fig. 4-40

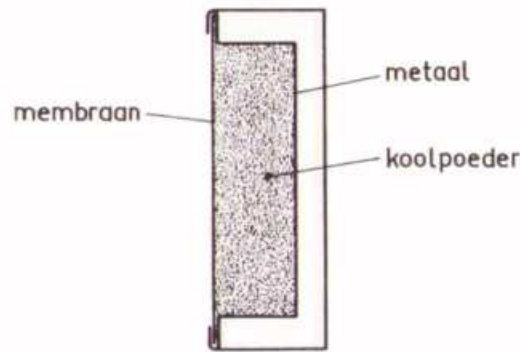


Fig. 4-41

Een ander voorbeeld van een mechanisch gevoelige weerstand is een koolmicrofoon. De weerstandswaarde verandert hier in het ritme van de opvallende geluidsgolven. De eigenlijke weerstand bestaat uit koolpoeder dat in meer of mindere mate wordt samengedrukt. In fig. 4-41 is het principe van een dergelijke microfoon afgebeeld.

4.7. Magnetisch gevoelige weerstanden

In fig. 4-42 is een dun metalen plaatje afgebeeld, dat is aangesloten op een spanningsbron, die een gelijkspanning levert. Door genoemd plaatje vloeit nu een gelijkstroom, waarbij de stroomdichtheid overal even groot is. De stroom vloeit in nagenoeg evenwijdige banen door het plaatje.

Wordt dit stroomvoerende plaatje tussen de polen van een magneet gebracht, dan verandert deze situatie. In fig. 4-43 is genoemd plaatje zodanig tussen de magneetpolen aangebracht, dat de stroomrichting en de richting van de magnetische krachtlijnen loodrecht op elkaar staan. Het afgebeelde plaatje ondervindt nu een kracht die het naar links wil doen verplaatsen. Deze kracht wordt uitgeoefend op de mobiele ladingdragers (geleidingselektronen) die door het plaatje vloeien. Aan-

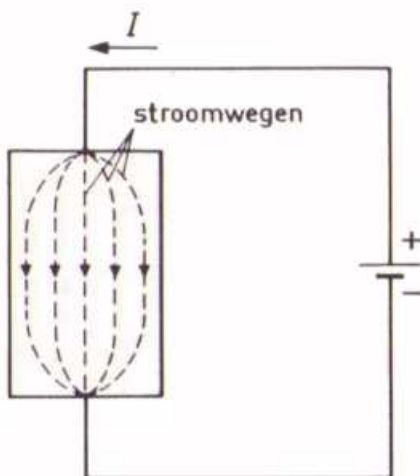


Fig. 4-42

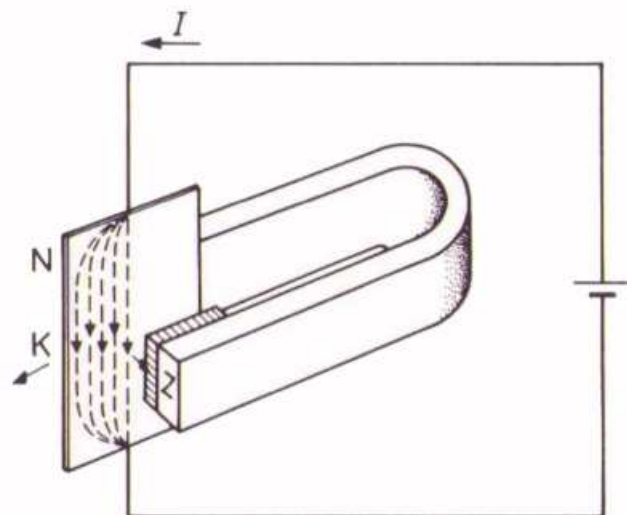


Fig. 4-43

gezien genoemd plaatje zich niet kan bewegen, worden de mobiele ladingdragers binnen het plaatje als het ware opzij geschoven. Dit betekent dat het aantal mobiele ladingdragers, dat zich binnen het plaatje in de invloedssfeer van het magnetisch veld bevindt verwaarloosbaar is. Het directe gevolg hiervan is een toename van de elektrische weerstand. In fig. 4-43 zijn de stroombanen, zoals deze thans binnen het plaatje verlopen, gestippeld aangegeven.

Zoals uit de figuur is te zien, is de effectieve doorsnede (de doorsnede die deelneemt aan de stroomgeleiding) kleiner dan de werkelijke doorsnede, zodat de weerstand globaal is toegenomen met een factor:
werkelijke doorsnede/effectieve doorsnede.

De aanwezigheid van een magnetisch veld beïnvloedt dus de weerstand van de stroomgeleider, in dit geval het metalen plaatje. Bij een metaal is de weerstandstoename echter gering en in de meeste gevallen alleen met speciale meetapparatuur vast te stellen. Een uitzondering hierop vormt het metaal bismut, dat dan ook al jaren wordt gebruikt in aftastelementen om de sterkte van magnetische velden te meten. Bovenvermeld verschijnsel werd dan ook pas echt belangrijk, toen speciale materialen werden ontwikkeld, waarbij veel grotere weerstandsveranderingen optreden. Vooral Siemens heeft op dit gebied veel aan research gedaan en zgn. veldplaten (fluxistors) ontwikkeld. Het gaat hierbij om materiaal met halfgeleideigenschappen, dat o.a. indium- en nikkelantimonide bevat. Om het effect te vergroten wordt genoemd materiaal als een uiterst dunne laag op een drager van isolatiemateriaal aangebracht en wel zodanig dat een zo lang mogelijk stroombaan wordt verkregen. Dit laatste komt in fig. 4-44 duidelijk tot uitdrukking.

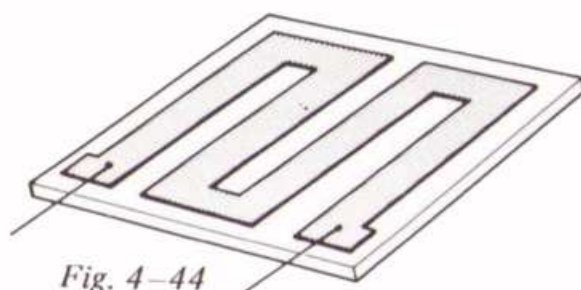


Fig. 4-44

Afhankelijk van de lengte, breedte en dikte van de magnetisch gevoelige laag kunnen fluxistors met verschillende nominale weerstandswaarden worden gefabriceerd. De weerstandswaarde stijgt bij een fluxistor met een nominale weerstand van $100\ \Omega$ tot ongeveer $1500\ \Omega$ als deze in een magnetisch veld wordt gebracht waarvan de inductie 1 tesla bedraagt (zie fig. 4-45).

4.7.1. Toepassingen

Fluxistors worden veel in de industriële elektronica toegepast, omdat daarmee stromen contactloos kunnen worden beïnvloed. Een typische analoge toepassing

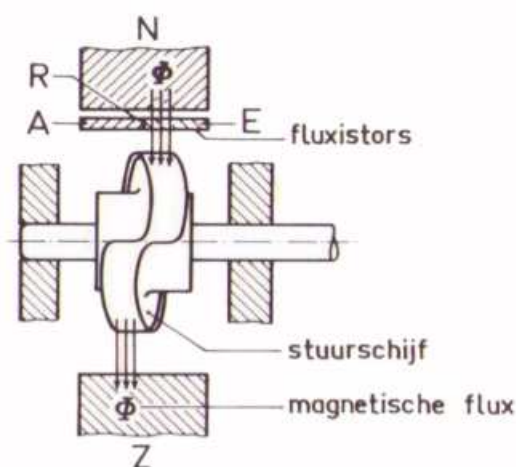
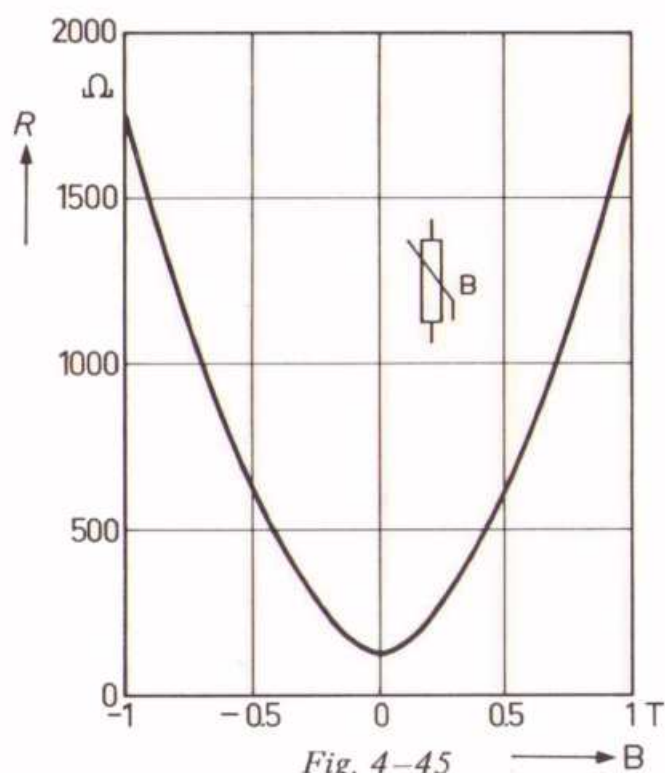


Fig. 4-46

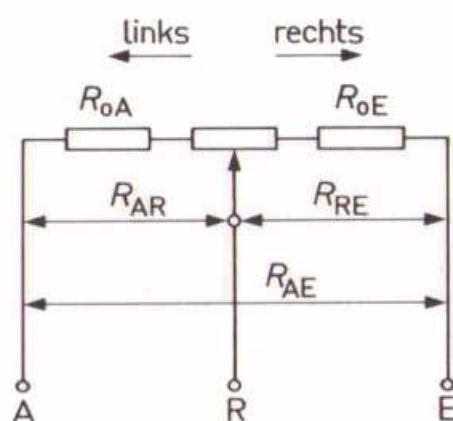


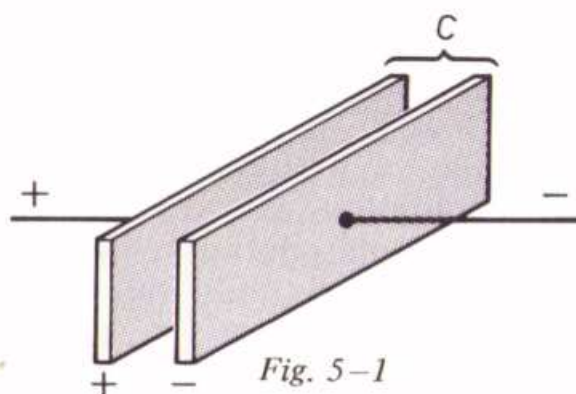
Fig. 4-47

is de fluxistorpotentiometer. In de luchtspleet van een permanente magneet zijn naast elkaar twee fluxistors geplaatst (zie fig. 4-46). Genoemde fluxistors, die in serie zijn geschakeld, bezitten een beginweerstand van ongeveer 35 Ω elk. Een speciaal gevormde schijf uit ferromagnetisch materiaal is binnen het magnetische veld draaibaar opgesteld. Door deze schijf te verdraaien, wordt het magnetische veld van de ene fluxistor naar de andere geschoven. Hierdoor veranderen de weerstanden R_{AR} en R_{RE} van de in serie geschakelde fluxistors (zie fig. 4-47). De totale weerstand van beide R_{AE} blijft daarbij nagenoeg ongewijzigd. De vorm van de schijf bepaalt het verloop van de weerstandskarakteristiek als functie van de asverdraaiing.

5. Condensatoren

5.1. Capaciteit

In principe bestaat elke condensator uit twee geleiders, die door een isolator van elkaar zijn gescheiden. Twee vlakke metalen platen, die evenwijdig aan elkaar zijn opgesteld en waartussen zich lucht als isolator bevindt, vormen zodoende het meest eenvoudige voorbeeld van een condensator. In fig. 5-1 is een dergelijke vlakke luchtcondensator afgebeeld.



De eerder genoemde geleiders worden gewoonlijk aangeduid als de elektroden van de condensator en de isolator tussen beide elektroden als het diëlektricum. Bij de condensator, afgebeeld in fig. 5-1 is lucht dus het diëlektricum.

Voor elke condensator geldt dat de spanning tussen de elektroden steeds recht evenredig is met de hoeveelheid lading die op een van de elektroden aanwezig is. (Op de andere elektrode is dan automatisch een even grote lading met tegengestelde polariteit aanwezig.) In de vorm van een formule geschreven:

$$Q = C \cdot U$$

Hierin is:

Q de hoeveelheid lading, die op de elektroden aanwezig is, in coulomb of ampere-seconde (C resp. A · s);

U de spanning tussen de elektroden in volt (V);

C een constante, die wordt aangeduid als de capaciteit van de condensator.

De eenheid van capaciteit is de farad (F), waarbij:

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

De eenheid farad is echter zeer groot, zodat in de praktijk wordt gerekend met kleinere eenheden. Dit zijn:

de microfarad (μF) = 10^{-6} F

de nanofarad (nF) = 10^{-9} F

de picofarad (pF) = 10^{-12} F

De grootte van de capaciteit van een condensator blijkt recht evenredig te zijn met de werkzame oppervlakte van de elektroden en omgekeerd evenredig met hun onderlinge afstand. Verder wordt de capaciteit ook nog beïnvloed door het materiaal dat als diëlektricum fungeert. De relatie tussen de verschillende grootheden wordt weergegeven door de formule:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_o \cdot A}{d}$$

C de capaciteit van de condensator (F).

ϵ_r de relatieve diëlektrische constante. Dit is een grootheid, die betrekking heeft op het materiaal dat als diëlektricum fungeert. Per definitie is het de verhouding tussen de capaciteit van een condensator met vacuüm als diëlektricum en eenzelfde condensator met het desbetreffende materiaal als diëlektricum.

ϵ_o een constante, waarvan de grootte wordt bepaald door het gekozen eenhedenstelsel. In het Giorgi-stelsel bedraagt deze constante $8,854 \cdot 10^{-12}$ (F/m).

A de werkzame oppervlakte van de elektroden (m^2).

d de afstand tussen de elektroden (m).

In de nu volgende tabel is de waarde van ϵ_r voor enkele isolatoren en vacuüm vermeld.

Materiaal	ϵ_r	Materiaal	ϵ_r
vacuüm	1	glas	5–7
lucht	1,0006	mica	7
papier	2	aluminiumoxyde	8
porselein	7	tantaaloxys	26

5.2. Relatie tussen capaciteit en weerstand van diëlektricum

Het diëlektricum tussen de elektroden gedraagt zich als een hoog-ohmige weerstand. De grootte hiervan kan worden berekend met de bekende formule:

$$R = \frac{d \cdot \rho}{A}$$

Hierin is:

R de weerstand tussen de beide elektroden (Ω);

d de dikte van het diëlektricum (m);

A de werkzame oppervlakte van de elektroden (m^2);

ρ de specifieke weerstand van het diëlektricum ($\Omega \cdot \text{m}$).

Substitutie van de formule voor de weerstand van het diëlektricum in de eerder vermelde formule voor de capaciteit levert:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \rho}{R}$$

Uit dit verband volgt dat de capaciteit (C) en de weerstand (R) bij dezelfde soort diëlektricum omgekeerd evenredig zijn aan elkaar. Dit betekent dat naarmate de capaciteit groter wordt, de totale gelijkstroomweerstand tussen de elektroden afneemt.

5.3. De lekstroom

Deze wordt gedefinieerd als de gelijkstroom, die bij normaal gebruik door de condensator vloeit. De sterkte van deze stroom wordt bepaald door de gelijkspanning tussen de elektroden en de weerstand van het diëlektricum. Laatstgenoemde weerstand is o.a. afhankelijk van de soort diëlektricum, de temperatuur en het fabricageproces.

$$I_{\text{le}} = \frac{U}{R}$$

Hierin is:

I_{le} de sterkte van de lekstroom (A);

U de gelijkspanning tussen de elektroden (V);

R de weerstand van het diëlektricum (Ω).

Substitutie geeft:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \rho \cdot I_{\text{le}}}{U}$$

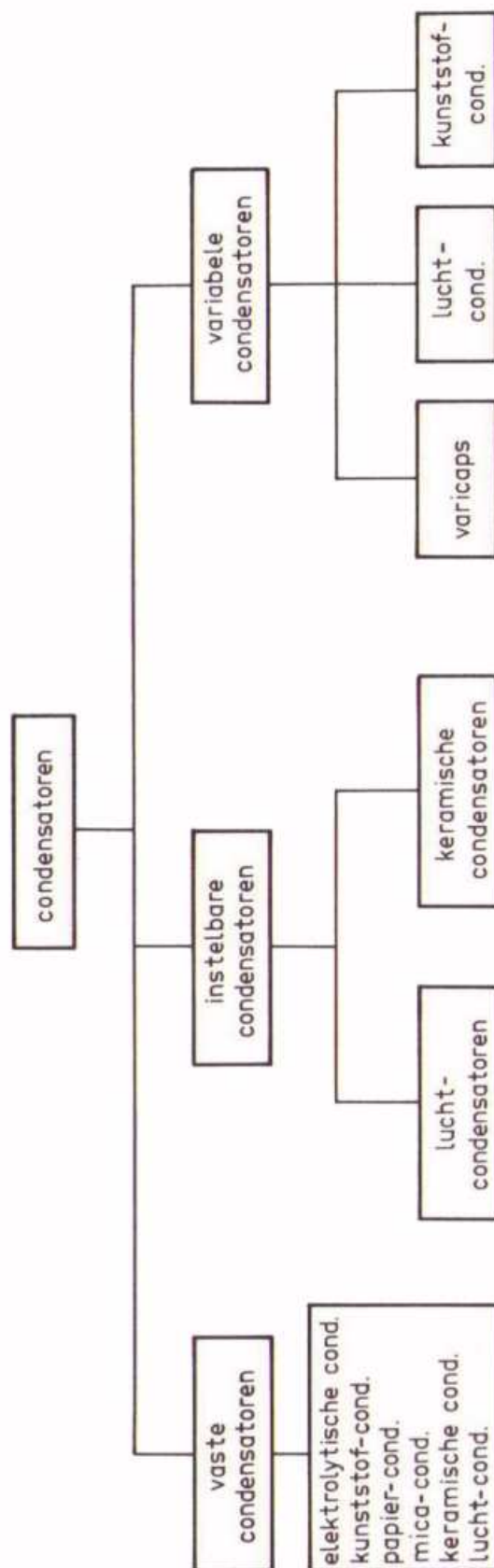
Bij een constante gelijkspanning (U) tussen de beide elektroden is de sterkte van de lekstroom (I_{le}) dus recht evenredig met de grootte van de capaciteit.

Uit het bovenstaande volgt direct dat de capaciteit van een condensator kan worden opgevoerd door:

- Het werkzame oppervlak van de elektroden te vergroten. Dit betekent in het algemeen een groter volume.
- De afstand tussen de elektroden te verkleinen, m.a.w. het isolatiemateriaal tussen de elektroden dunner te maken. Dit laatste resulteert echter automatisch in een lagere toelaatbare spanning tussen de elektroden.
- Isolatiemateriaal met een zo groot mogelijke relatieve diëlektrische constante toe te passen. Hierbij dient echter wel rekening te worden gehouden met eisen betreffende betrouwbaarheid, veiligheid en verwerkbaarheid. Het materiaal mag bijv. niet ontvlambaar zijn en moet zich lenen voor massafabricage.

5.4. Soorten condensatoren

Door de meeste verbruikers van condensatoren worden in de eerste plaats bepaalde eisen gesteld voor wat betreft: capaciteitswaarde en tolerantie, maximaal toe-



Overzicht 5-1

laatbare spanning, volume en kostprijs. Het specifieke *CU*-produkt is daarbij een condensatorgrootheid waarin deze criteria tot op bepaalde hoogte zijn verwerkt. Genoemde grootheid luidt:

$$\frac{\text{capaciteit} \times \text{maximaal toelaatbare spanning}}{\text{volume}}$$

en heeft in belangrijke mate betrekking op: constructie, gebruikte materialen en fabricageproces.

Waarom worden nu zoveel verschillende soorten condensatoren op de markt gebracht? Dit komt omdat aan het diëlektricum vaak nog meer eisen worden gesteld dan in het specifieke *CU*-produkt tot uitdrukking komen. Om enkele voorbeelden te noemen:

- a. de temperatuurcoëfficiënt van het diëlektricum (deze kan positief, negatief, groot dan wel klein zijn);
- b. de verliezen in het diëlektricum (speciaal wanneer gewerkt wordt met hoogfrequente wisselspanningen);
- c. de betrouwbaarheid;
- d. de maximaal toelaatbare temperatuur;
- e. de stabiliteit, m.a.w. het capaciteitsverloop na b.v. 1000 uren in bedrijf te zijn;
- f. de tolerantie van de capaciteitswaarde;
- g. de zelfinductie.

De condensatoren kunnen in drie hoofdgroepen worden verdeeld (zie ook overzicht 5-1).

1. Vaste condensatoren (onveranderlijke capaciteit).
2. Instelbare condensatoren (trimmers).
3. Variabele condensatoren (afstemcondensatoren).

De vaste condensatoren zijn op hun beurt weer te verdelen naar het diëlektricum dat is toegepast en de konstruktie. De voornaamste soorten zijn:

1. Elektrolytische condensatoren.
2. Micacondensatoren.
3. Keramische condensatoren.
4. Kunststofcondensatoren.
5. Papiercondensatoren.
6. Luchtcondensatoren.

5.5. Elektrolytische condensatoren

Deze condensatoren danken hun naam aan het feit dat het diëlektricum door elektrolyse wordt verkregen. In fig. 5-2 is het principe van een dergelijke condensator afgebeeld.

De beide elektroden (A en B) bestaan uit stroken metaalfolie, waarbij aluminium het meeste voor dit doel wordt gebruikt. De elektrode B is in dat geval bedekt met een dunne laag aluminiumoxyde (Al_2O_3), die na fabricage van de condensator door formeren op deze elektrode wordt aangebracht. De dikte van de oxydelaag wordt daarbij bepaald door de grootte van de formeerspanning en bedraagt ca. $0,0012 \mu\text{m}/\text{V}$. Genoemde oxydelaag, die zich gedraagt als een uitstekende isolator, fungeert nu als diëlektricum van de condensator. De elektrode B wordt gewoonlijk aangeduid als de anode, terwijl de tegenover liggende elektrode A katode wordt genoemd. Tussen anode en katode bevindt zich een stroomgeleidend medium, in het algemeen een elektrolyt, doch bij bepaalde uitvoeringen is het een halfgeleider.

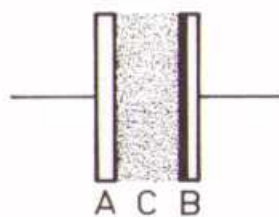
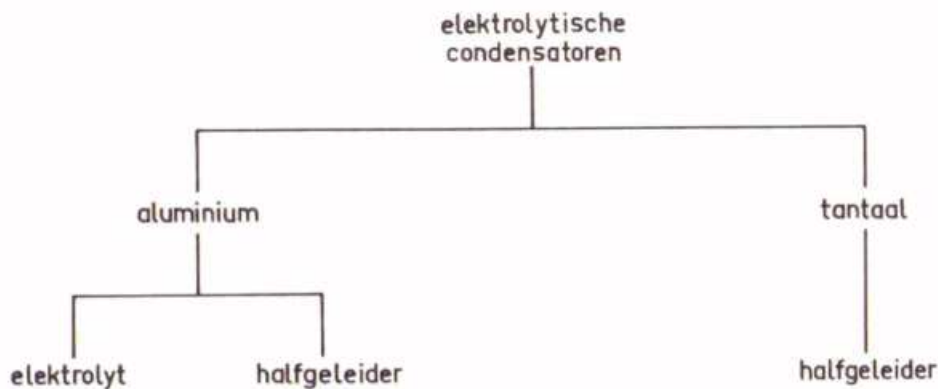


Fig. 5-2

De verschillende soorten elektrolytische condensatoren kunnen als volgt worden gegroepeerd.



Allereerst is hier een verdeling gemaakt aan de hand van het anodemateriaal, dat van aluminium dan wel van tantaal is. De verdere onderverdeling is gebaseerd op het stroomgeleidend medium tussen beide elektroden. Dit kan een elektrolyt of een halfgeleider zijn. In fig. 5-3 zijn enkele veel voorkomende uitvoeringen van aluminium condensatoren, alsmede een tantaalcondensator in pareluitvoering afgebeeld.

Het zal duidelijk zijn dat bovenstaande uitvoeringen slechts een klein deel uitmaken van het aantal verschillende typen dat door de fabrikanten van deze condensatoren op de markt wordt gebracht.

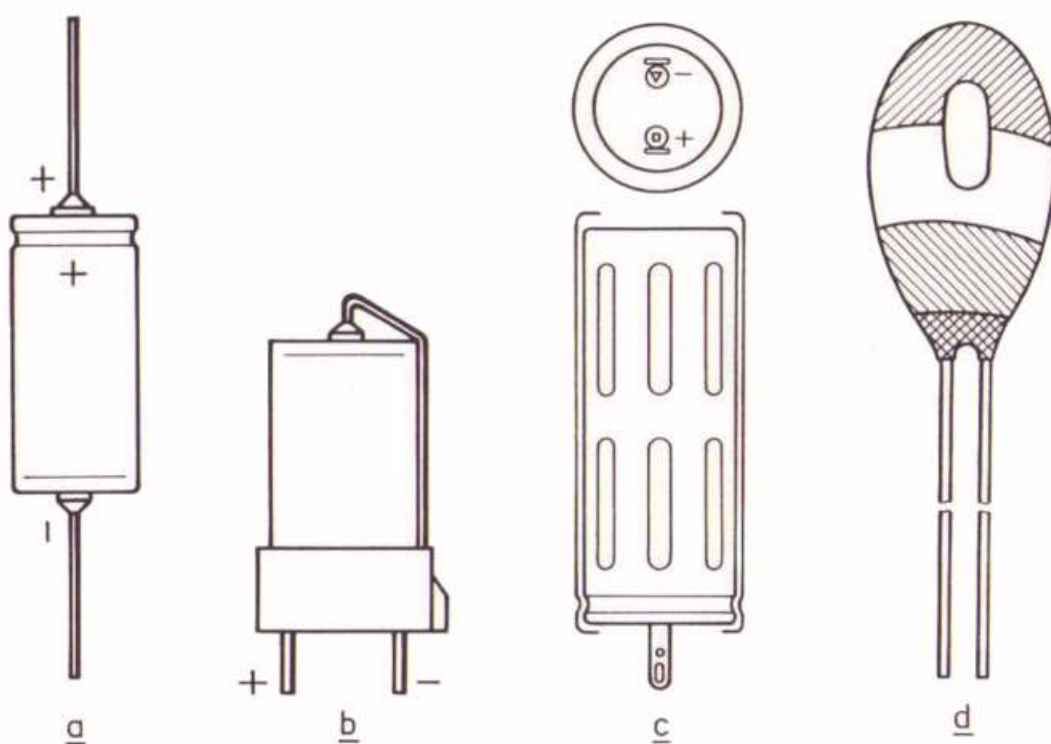


Fig. 5-3. a. Een miniatuur-uitvoering met axiale aansluitingen.
 b. Een miniatuur-uitvoering voor verticale montage op panelen met een gedrukte bedrading.
 c. Een grotere uitvoering met soldeerlippen.
 d. Een tantaalcondensator (pareluitvoering).

5.5.1. Aluminium-condensatoren met elektrolyt

Het is tegenwoordig mogelijk om elektrolytische condensatoren met een zeer grote capaciteit en relatief klein volume in grote series te fabriceren. Hiertoe wordt:

- het werkzame oppervlak van beide elektroden zo groot mogelijk gemaakt. Dit wordt bereikt door uiterst dunne elektroden te verwerken (aluminiumfolie) en de desbetreffende oppervlakken nog eens extra te vergroten door deze ruw te maken met behulp van een ets- of beitsproces.
- een uiterst dun homogeen diëlektricum gekozen met een relatief hoge waarde van ϵ_r . Dit wordt bereikt door de elektrode die als anode gaat fungeren te bedekken met een dunne laag aluminiumoxyde (Al_2O_3).

Aangezien dit laatste door elektrolyse plaats vindt, dienen zowel het aluminium als de elektrolyt zeer zuiver te zijn. De zuiverheid van het anodemateriaal bedraagt bijv. in veel gevallen 99,99%.

Is dit niet het geval, dan is de dikte van het diëlektricum niet overal gelijk, iets dat aanleiding kan geven tot doorslag van het diëlektricum op de dunnere plaatsen. Fig. 5-4 toont een sterk vergrote doorsnede van een dergelijke condensator. In deze figuur is duidelijk de ruwheid van het werkzame oppervlak van beide elektroden (a = anode en b = katode) te onderkennen. De oxydelaag op de anode is in de

figuur aangegeven met de letter d. Deze laag vormt het diëlektricum van de condensator en heeft veelal een dikte van $0,7\ \mu\text{m}$. Dit betekent dat in het diëlektricum zeer grote veldsterkten optreden. De katode is eveneens met een, zij het uiterst dun, laagje aluminiumoxyde bedekt. Dit als gevolg van de inwerking van de elektrolyt.

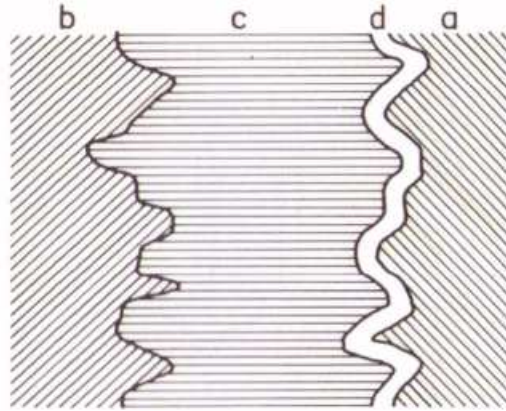


Fig. 5-4

Tussen de anode (a + d) en de katode (b) bevindt zich de elektrolyt (c), bestaande uit een of meer lagen hygroscopisch papier doordrenkt met bijv. een oplossing van boorzuur in ethyleenglycol. Genoemde elektrolyt heeft echter niet alleen de taak om een goed elektrisch contact (ionengeleiding) tussen de ruwe oppervlakken van beide elektroden te bewerkstelligen, doch voorkomt ook dat deze oppervlakken elkaar raken met als gevolg dat de oxydelaag wordt beschadigd. Beide elektroden zijn tezamen met de papieren tussenlaag opgerold en ondergebracht in een tube of bus van aluminium. Het geheel is afgesloten met een schijf hardpapier, die is beplakt met een ring van rubber, dan wel voorzien van een rubberen stop. De bus, die geleidend is verbonden met de katode, wordt vooral bij de kleinere uitvoeringen, vaak ook nog voorzien van kunststofisolatie (veelal doorschijnend blauw). Na fabricage wordt de condensator geformeerd d.w.z. aangesloten op een gelijkspanning waarbij de anode met + en de katode met - is verbonden. Door de gelijkstroom, die als gevolg van de aangelegde spanning door de condensator vloeit, vormt zich de reeds bekende oxydelaag op de anode. De dikte van deze laag wordt dan ook bepaald door de maximale gelijkspanning tijdens het formeren.

Het bovenstaande betekent dat een elektrolytische condensator gepolariseerd is en bijgevolg zodanig in de stroomketen moet worden opgenomen dat de anode altijd met + is verbonden. Dit teken staat op de meeste van deze condensatoren bij de desbetreffende aansluiting aangegeven.

Opmerking.

Er zijn ook uitvoeringen waarbij de beide elektroden zijn voorzien van een laag aluminiumoxyde. Deze zgn. bipolaire elektrolytische condensatoren kunnen zowel op gelijk- als wisselspanningen worden aangesloten. Hier is sprake van een serie-schakeling van twee elektrolytische condensatoren zodat de totale capaciteit de helft bedraagt van de deelcapaciteiten.

5.5.2. Het elektrisch vervangschema

Het is mogelijk om van een elektrolytische condensator een elektrisch vervangschema op te stellen. Uitgegaan wordt daarbij van de zgn. anodecapaciteit C_a . Dit is de capaciteit, die wordt gevormd door de laag aluminiumoxyde op de anode en de contactvlakken „elektrolyt/oxyde en oxyde/aluminium” (zie fig. 5-5).

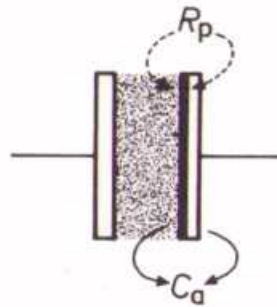


Fig. 5-5

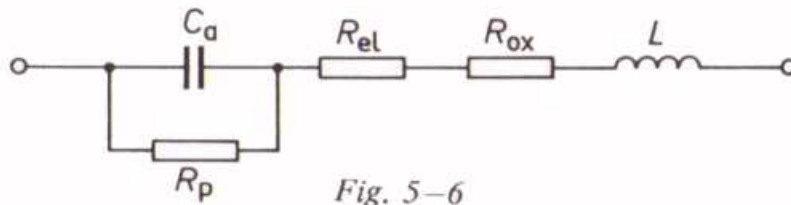


Fig. 5-6

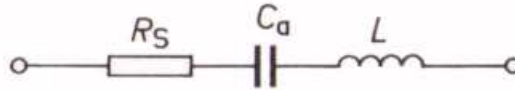


Fig. 5-7

Parallel aan deze capaciteit is een weerstand R_p aanwezig. Dit is de gelijkstroomweerstand van het diëlektricum en onder normale omstandigheden dus zeer hoog. In serie met deze parallelschakeling bevinden zich de weerstanden R_{el} en R_{ox} . Eerstgenoemde weerstand heeft betrekking op de elektrolyt, terwijl de tweede weerstand wordt veroorzaakt door de zeer dunne laag oxyde op de katode. Verder bezit het opgerolde pakket nog een bepaalde, zij het geringe zelfinductie (L). Het totale vervangschema ziet er dan uit als afgebeeld in fig. 5-6.

Wordt de parallelweerstand R_p omgerekend tot een seriëweerstand, dan kan fig. 5-6 worden vereenvoudigd tot de serieschakeling, die is afgebeeld in fig. 5-7. In dit schema stelt R_s de som van R_{el} , R_{ox} en de omgerekende R_p voor. De impedantie van de condensator bedraagt zodoende:

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{1}{\omega C_a}\right)^2}$$

Bij benadering geeft deze formule dus het elektrisch gedrag van een elektrolytische condensator weer.

Voor signalen met een frequentie van rond de 50 Hz kan de genoemde formule worden vereenvoudigd tot:

$$Z = \frac{1}{\omega C_a}$$

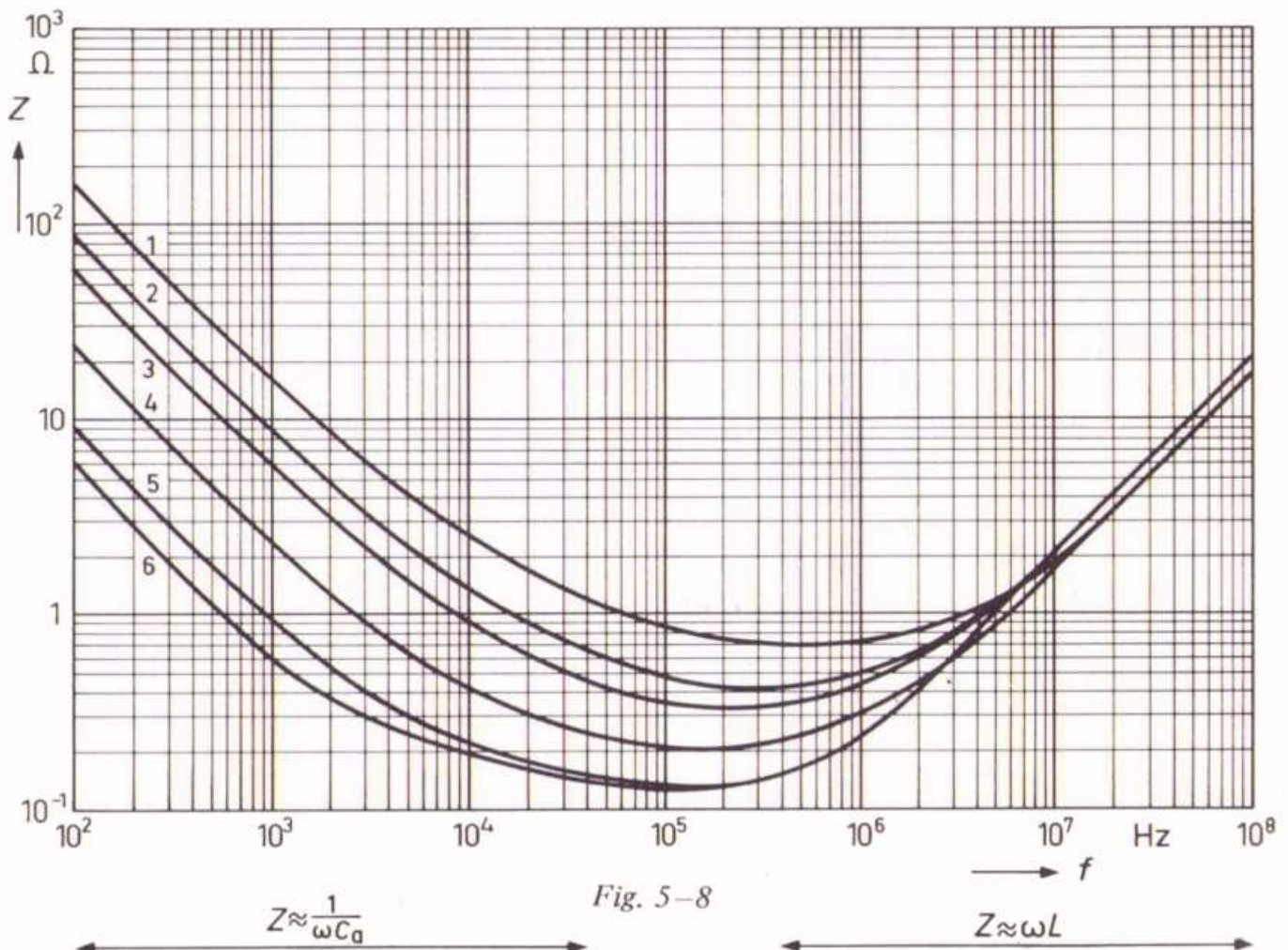
De condensator gedraagt zich voor lage frequenties dus als een zuivere capaciteit. Voor signalen met een frequentie van ongeveer 100 kHz is:

$$Z \approx R_s$$

In dit frequentiegebied compenseren de capacatieve en inductieve reactanties elkaar nagenoeg geheel ($\omega L \approx \frac{1}{\omega C_a}$).

Voor signalen met frequenties van 100 MHz en hoger domineert de zelfinductie van de condensator en is:

$$Z \approx \omega L$$



Bij de publikatie van de impedantie van een elektrolytische condensator dient dus steeds de frequentie te worden vermeld, waarop deze impedantie betrekking heeft. Dus bijv. $1\ \Omega$ bij 100 kHz. In fig. 5–8 is een grafiek afgebeeld, die voor enkele soorten elektrolytische condensatoren de relatie weergeeft tussen de frequentie en de impedantie van de condensator.

Zowel de impedantie als de frequentie zijn in deze figuur op logaritmische schaal uitgezet.

Indien wordt uitgegaan van het gegeven dat een elektrolytische condensator zich gedraagt als een ideale (verliesvrije) condensator C met daarmee in serie geschakeld een weerstand R_s , dan ziet het vectordiagram dat het verband aangeeft tussen de wisselspanning over de condensator en de wisselstroom, die als gevolg van deze spanning door de condensator vloeit, eruit als afgebeeld in fig. 5–9.

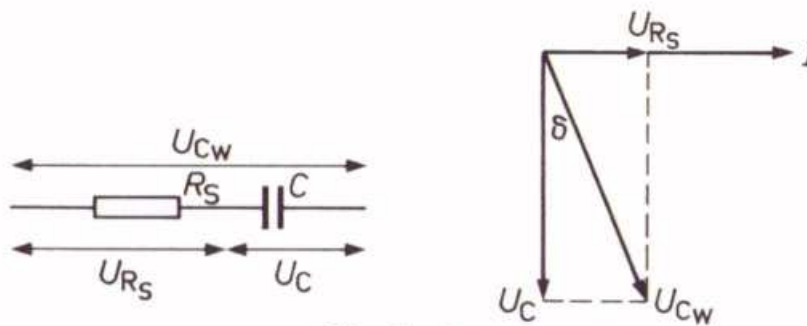


Fig. 5–9

De spanning U_{rs} over de weerstand R_s is hierbij in fase met de wisselstroom I_c , die door de condensator vloeit, terwijl de spanning U_c (over de ideale condensator C) 90° naait t.o.v. I_c .

De condensatorwerking (90° faseverschil tussen I_c en U_c) wordt door de aanwezigheid van de weerstand R_s ongunstig beïnvloed, iets dat tot uitdrukking komt in de grootte van de hoek δ tussen U_c (de spanning over de ideale condensator) en U_{cw} (de werkelijke spanning over de condensator).

5.5.3. De dissipatiefactor en de rimpelstroom

De grootte van de hoek δ , die als dissipatiefactor wordt aangeduid, is als volgt te berekenen:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{rs}}{U_c} = \frac{I_c \cdot R_s}{I_c \cdot \frac{1}{\omega C}} = \omega \cdot C \cdot R_s$$

m.a.w. $\operatorname{tg} \delta$ is voor een bepaalde capaciteit recht evenredig met de frequentie van de wisselspanning over de condensator en de grootte van de seriële weerstand R_s . $\operatorname{Tg} \delta$ is zodoende een maatstaf voor de kwaliteit van de condensator. De kwaliteit

neemt toe, naarmate R_s kleiner wordt. De waarde van $\text{tg}\delta$ varieert veelal tussen 0,05 en 0,4. Zeer vaak wordt $\text{tg}\delta$ uitgedrukt in procenten ($\text{tg}\delta \cdot 100\%$).

Een elektrolytische condensator wordt veelal opgenomen in een stroomketen, waarin zowel gelijk- als wisselspanningen optreden. Gedacht wordt hier bijv. aan afvlakfilters van gelijkrichters. Bij een dergelijke schakeling bevindt zich tussen de beide elektroden een gelijkspanning (die geblokkeerd wordt) met daarop gesuperponeerd een wisselspanning, de zgn. rimpelspanning. Als gevolg van deze spanning vloeit er door de condensator een wisselstroom, de rimpelstroom, waardoor in de weerstand R_s per seconde een hoeveelheid warmte wordt ontwikkeld, die gelijk is aan:

$$P \approx U_{\text{cw}}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_s$$

Het directe gevolg hiervan is dat de temperatuur van de condensator oploopt, iets dat een ongunstige invloed heeft op de levensduur van de condensator (o.a. wordt de elektrolyt agressiever). De fabrikant vermeldt dan ook steeds de maximaal toelaatbare waarde van de rimpelstroom bij een bepaalde frequentie (meestal is dit 100 Hz) en de maximaal toelaatbare temperatuur.

Wanneer een elektrolytische condensator lange tijd bijv. meer dan een jaar niet wordt gebruikt, verdient het aanbeveling om eerst de lekstroom te meten alvorens de condensator in de schakeling op te nemen. Door het lange liggen wordt nl. de oxydelaag automatisch iets dunner als gevolg van de inwerking van de elektrolyt. Het directe gevolg is een toename van de lekstroom en een daling van de maximaal toelaatbare spanning. Het verdient dan ook aanbeveling om dergelijke condensatoren eerst te controleren en ze zonodig opnieuw te formeren (let daarbij op de juiste polariteit).

5.5.4. De vaste aluminium condensator

Dit type condensator verschilt in zoverre van het voorgaande type dat de elektrolyt is vervangen door een halfgeleider, dus een vaste stof. Meestal is dit bruinsteen (MnO_2), waarin tevens glasvezels zijn verwerkt om de elektroden op afstand van elkaar te houden. Fig. 5–10 toont de doorsnede van de beide elektroden met de tussenlaag.

Deze condensatoren zijn zeer stabiel, terwijl een relatief grote rimpelstroom kan worden toegelaten. Veelal is deze een factor 2 à 3 groter dan die bij de gelijkwaardige condensator met een elektrolyt. Het nadeel van deze condensatoren is dat het diëlektricum zich bij doorslag niet herstelt. Verder is de invloed van de temperatuur op de capaciteit geringer. Zie fig. 5–10a. In deze figuur is de verhouding C_t/C_{25} als functie van de temperatuur uitgezet. C_{25} is de capaciteit bij 25 °C.

5.5.5. Tantaalcondensatoren

In fig. 5–11 is de doorsnede van een dergelijke condensator afgebeeld. De anode bestaat hier uit gesinterd tantaalpoeder, waardoor het oppervlak zeer ruw en dus

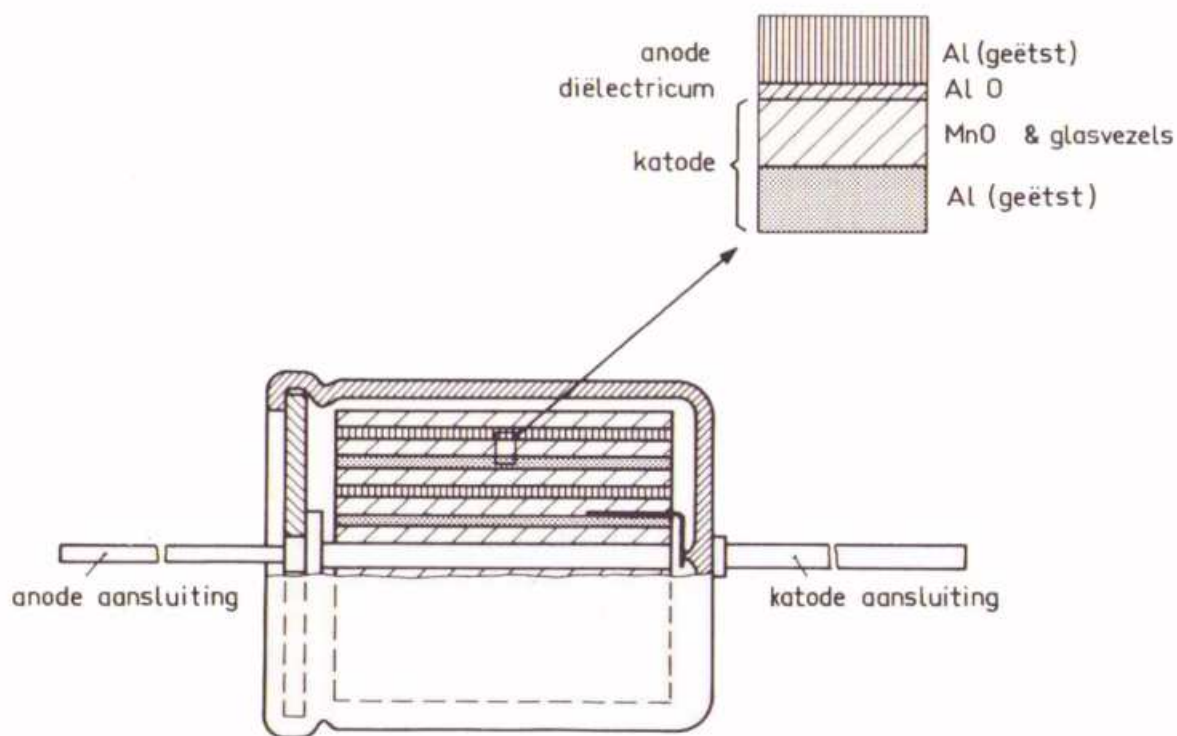


Fig. 5-10

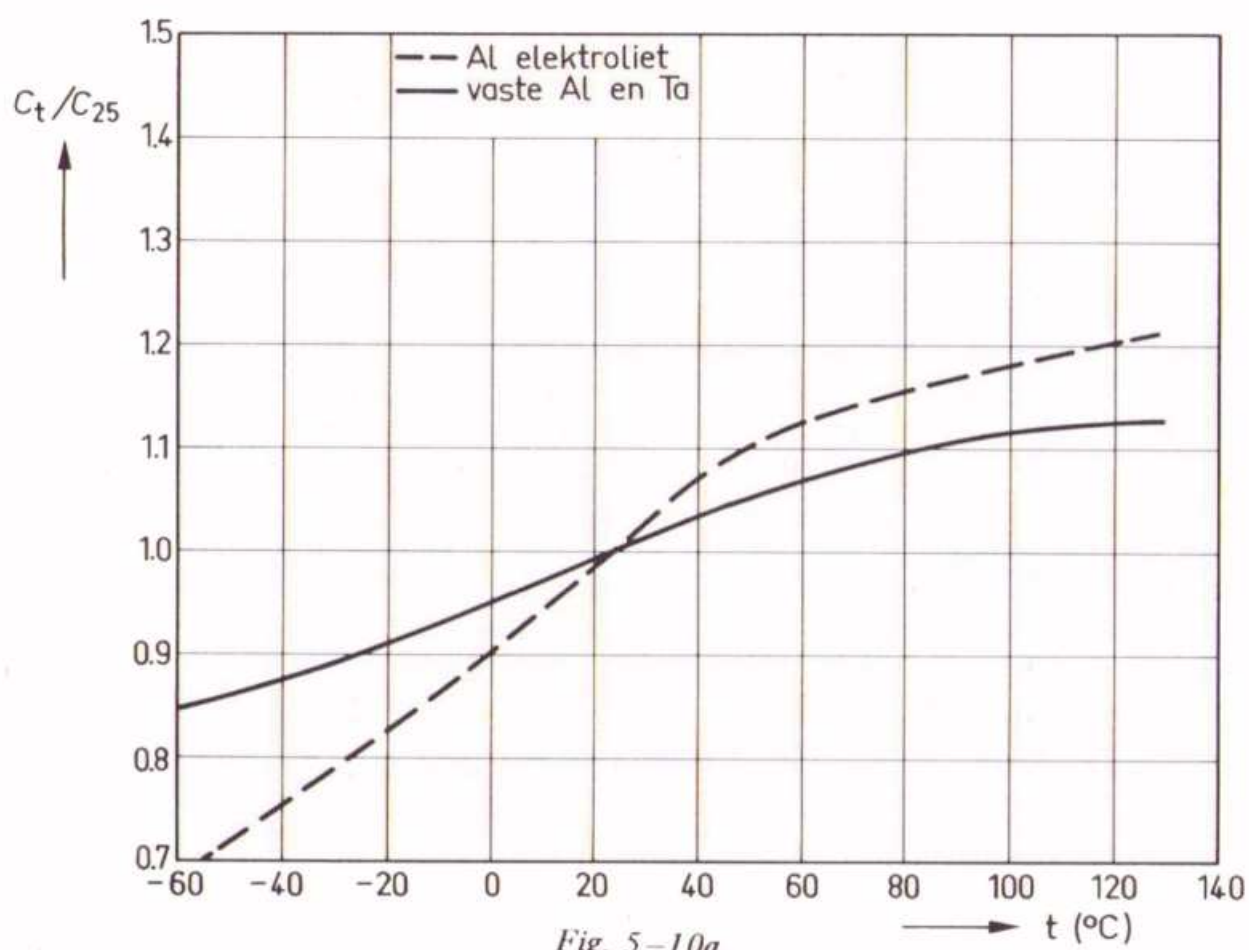
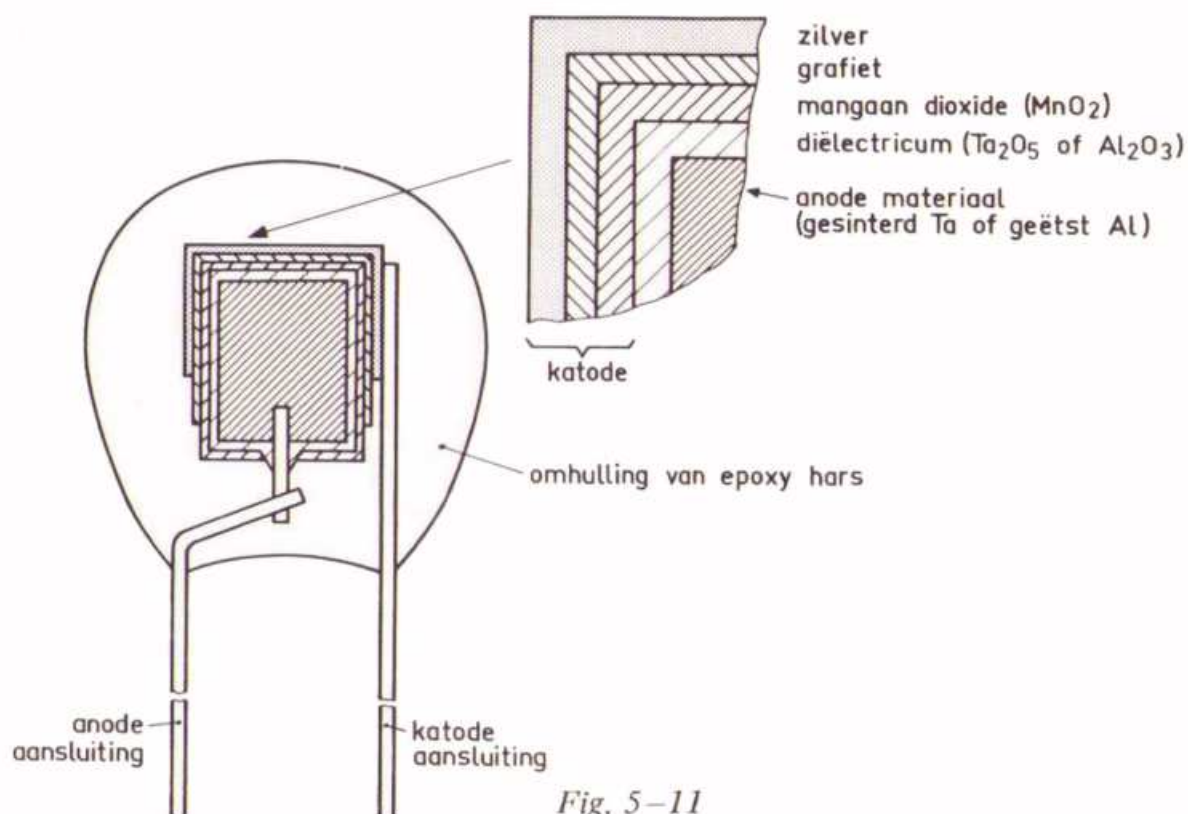


Fig. 5-10a

aanzienlijk vergroot is. Deze anode is bedekt met een dunne laag tantaaloxys (Ta₂O₅), dat als diëlektricum fungeert.

Hieromheen is een laag bruinsteen aangebracht, die als geleidingsmedium fungeert tussen de katode (een laag grafiet bedekt met zilver) en het eerder genoemde diëlektricum. Het geheel is omgeven door een mantel van epoxyhars, waardoor een pareluitvoering wordt verkregen. De capaciteit en de maximaal toelaatbare spanning zijn gewoonlijk op de condensator aangegeven in de vorm van een kleurcode.



De anode aansluiting van de condensator is als volgt te onderkennen.

Wanneer naar de gekleurde stip wordt gekeken en de aansluitdraden zijn naar beneden gericht, dan is de rechter aansluiting de anode.

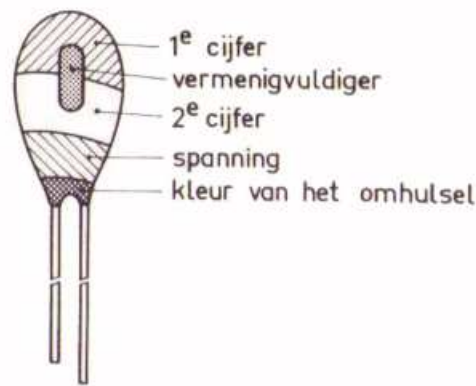
Tantaalcondensatoren bezitten een groot specifiek *CU*-produkt en zijn zeer betrouwbaar. Ze worden dan ook veel toegepast in professionele apparatuur waar hoge eisen aan de betrouwbaarheid worden gesteld en slechts een gering volume ter beschikking is. Andere toepassingen bevinden zich op het gebied van de hoorapparaten en oproepapparatuur, alsmede elektronische horloges.

5.5.6. Algemene opmerkingen

Elektrolytische condensatoren worden veelal kortweg aangeduid als elco's. Bij gebruik dient op de volgende punten te worden gelet.

- Is de condensator geschikt voor de desbetreffende spanning.
- Wordt de elco op de juiste manier aangesloten (denk aan de polariteit).
- Bij vervanging heeft de nieuwe elco niet te lang op magazijn gelegen (in het laatste geval is het aan te bevelen om de isolatieweerstand te controleren).

Kleurcode tantaalcondensatoren.



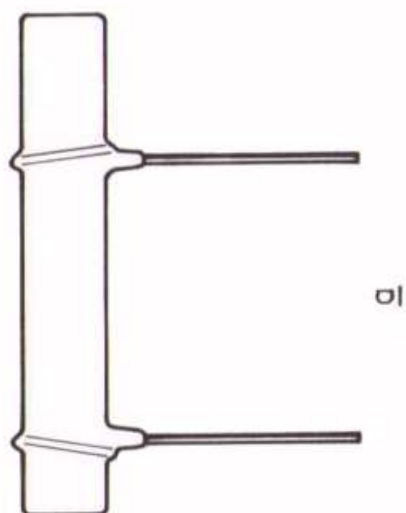
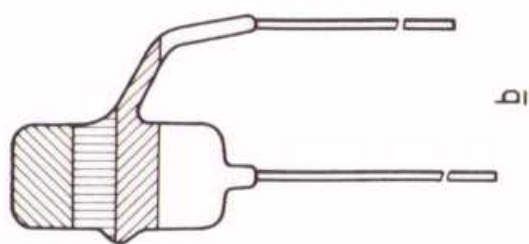
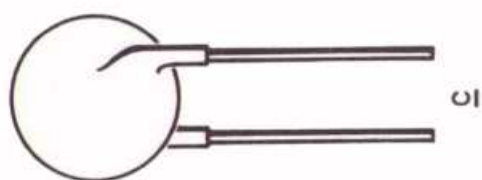
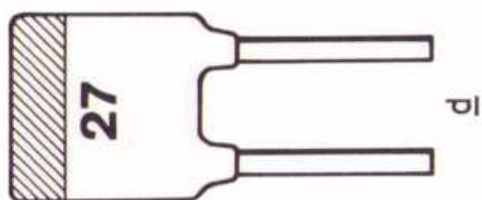
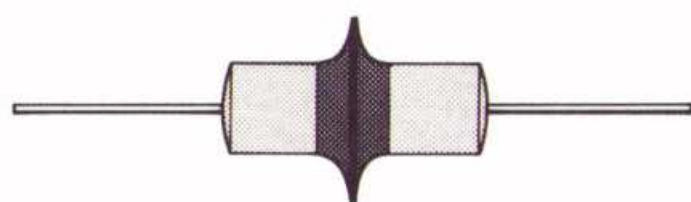
Kleur	Capaciteit μF		Vermenig- vuldiger	Spanning V
	1e cijfer	2e cijfer		
zwart	—	0	1	10
bruin	1	1	—	1,6
rood	2	2	—	4
oranje	3	3	—	40
geel	4	4	—	6,3
groen	5	5	—	16
blauw	6	6	—	—
violet	7	7	10^{-3}	—
grijs	8	8	10^{-2}	25
wit	9	9	10^{-1}	2,5

De betrouwbaarheid en levensduur van een elektrolytische condensator worden bepaald door de volgende factoren:

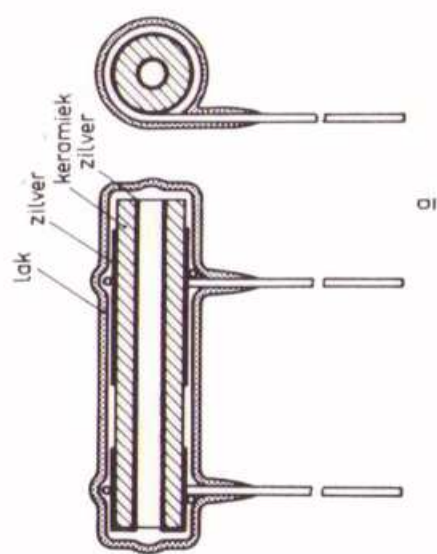
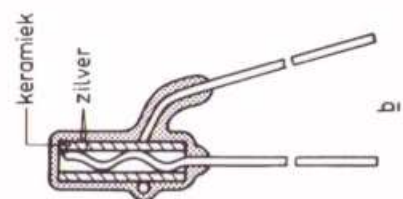
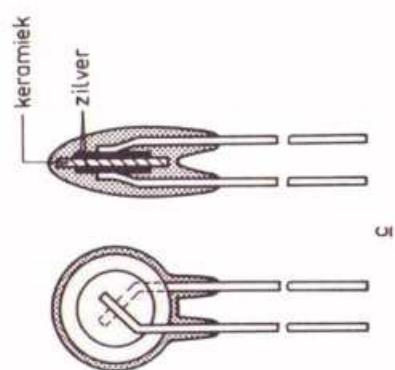
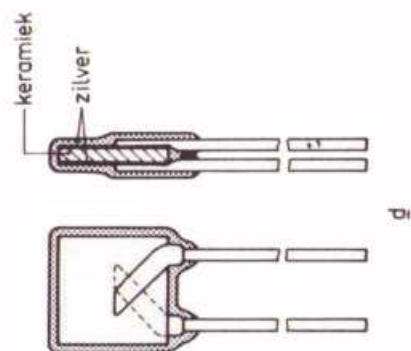
1. De temperatuur en aangelegde spanning; dus punten die betrekking hebben op de toepassing.
2. De zuiverheid van de gebruikte materialen, soort elektrolyt, fabricageproces en eindcontrole; m.a.w. de kwaliteit van het gerede produkt.

5.6. Keramische condensatoren

Bij deze condensatoren worden de beide elektroden van elkaar gescheiden door keramisch materiaal, dat als diëlektricum fungeert. Keramische condensatoren worden in grote verscheidenheid, zowel wat betreft het uiterlijk als de elektrische eigenschappen, op de markt gebracht. Om hiervan een indruk te geven, zijn in



aanzicht



doorsnede

Fig. 5-12

fig. 5—12 enkele van de meest gangbare typen afgebeeld. De klassieke keramische buiscondensator is weergegeven in fig. 5—12a. Dit type wordt in veel variaties voor wat betreft de elektrische eigenschappen zoals: capaciteitswaarde, toelaatbare spanning, temperatuurcoëfficiënt, enz. gefabriceerd.

In fig. 5—12b is de pareluitvoering (pin-up-uitvoering) weergegeven. Dit type wordt vooral toegepast in apparatuur waarvan de bedrading in de vorm van gedrukte bedradingspanelen (zie ook blz. 162) is uitgevoerd (vertikale montage).

Hetzelfde geldt voor de schijfcondensatoren (fig. 5—12c) en de miniatuuruitvoering die is afgebeeld in fig. 5—12d.

Een zeer speciale konstruktie is de zogenaamde keramische doorvoercondensator die in fig. 5—12e is afgebeeld.

Bovenvermelde verscheidenheid voor wat betreft de vorm is in eerste instantie te danken aan het feit dat het diëlektricum gemakkelijk in elke gewenste vorm kan worden geperst. De elektrische eigenschappen worden in sterke mate bepaald door de samenstelling en de dikte van het diëlektricum.

De verschillende materialen die in aanmerking komen om als diëlektricum te worden gebruikt, zijn in drie hoofdgroepen te verdelen, nl. de groep waarbij de nadruk wordt gelegd op het gedrag van de temperatuurcoëfficiënt en twee groepen waarbij een zo groot mogelijke waarde van de relatieve diëlektrische constante wordt nagestreefd. De eerste groep omvat de condensatoren waarvan de relatieve diëlektrische constante (ϵ_r) varieert tussen de waarden 5 en 250.

De condensatoren die zijn ondergebracht in de tweede groep hebben een ϵ_r welke groter is dan 250, terwijl de condensatoren in de derde groep een diëlektricum van halfgeleidermateriaal bezitten en slechts bestand zijn tegen een lage spanning (maximaal toelaatbare spanning gewoonlijk kleiner dan 25 V).

5.6.1. De temperatuurcoëfficiënt

Onder de temperatuurcoëfficiënt (TC) wordt de capaciteitsverandering van de condensator per eenheid van capaciteit (hier pF) verstaan, die optreedt bij een temperatuursverandering van 1 °C.

$$TC = \frac{\Delta C}{C} \text{ per } ^\circ\text{C}$$

Genoemde capaciteitsverandering kan bij oplopende temperatuur positief dan wel negatief zijn. In het eerste geval wordt de capaciteit groter bij oplopende temperatuur en in het tweede geval kleiner. Genoemde eigenschap wordt bepaald door de samenstelling van het materiaal dat als diëlektricum fungeert.

In de literatuur en catalogi wordt de temperatuurcoëfficiënt gewoonlijk niet vermeld in pF/pF/°C, doch in PPM/°C (parts per million per degree C), omdat dit waarden geeft die beter zijn te overzien. Voor de gepubliceerde waarden wordt een hoofdletter P of N geplaatst, waarmee wordt aangegeven dat resp. sprake is van een positieve of negatieve temperatuurcoëfficiënt. Zo heeft een condensator

met N150 een negatieve temperatuurcoëfficiënt van 150×10^{-6} pF/pF/°C. Bij de condensatoren die tegenwoordig op de markt worden gebracht, varieert de temperatuurcoëfficiënt veelal tussen P100 en N5600.

Genoemde verschillen in de *TC* worden bepaald door de samenstelling van het diëlektricum. Bevat dit o.a. magnesiumtitanaat, dan is de *TC* positief, terwijl barium- dan wel calciumtitanaat aanleiding geeft tot een negatieve *TC*.

De verschillende grondstoffen, die tezamen het diëlektricum vormen, worden eerst gemalen en daarna intensief gemengd. Vervolgens wordt het aldus verkregen keramisch materiaal door extrusie, walsen of persen in de gewenste vorm gebracht en daarna gesinterd in een bepaalde atmosfeer (de temperatuur varieert daarbij van 1200–1400 °C).

De elektroden worden voor het sinteren aangebracht in de vorm van een pasta, die bij de eerder vermelde temperatuur ontleedt, waarbij een laagje zilver achterblijft. Na het aanbrengen van de aansluitdraden wordt het geheel bedekt met één of meer lagen isolerende lak.

5.6.2. Codering

Op de condensator moeten een aantal eigenschappen worden vermeld. De belangrijkste zijn: de capaciteit en tolerantie, de temperatuurcoëfficiënt en soms de maximaal toelaatbare spanning. Meestal vindt deze aanduiding plaats met behulp van een bepaalde codering.

Sommige fabrikanten geven *TC*, capaciteit en tolerantie aan met behulp van gekleurde stippen of ringen, andere gebruiken een cijfer/letter code om desbetreffende grootheden te vermelden. In de nu volgende tabellen is de sleutel van een tweetal coderingen aangegeven.

5.6.3. Toepassingen

De condensatoren met een ϵ_r , variërend van 5 tot 250, in de literatuur vaak aangeduid als condensatoren met „low K ceramic” bezitten een aantal eigenschappen waarvan de volgende de belangrijkste zijn:

- de temperatuurcoëfficiënt blijft bij de verschillende temperaturen constant. Hierdoor is het mogelijk om de temperatuurgevoeligheid van andere onderdelen, die meestal positief is, te compenseren (bijv. door een condensator met een negatieve *TC* in serie met het betreffende onderdeel te schakelen). Dit betekent dat deze condensatoren zich bij uitstek lenen voor oscillatorschakelingen.
- de capaciteit is zeer stabiel, zodat weinig drift is te verwachten.
- geringe HF verliezen.

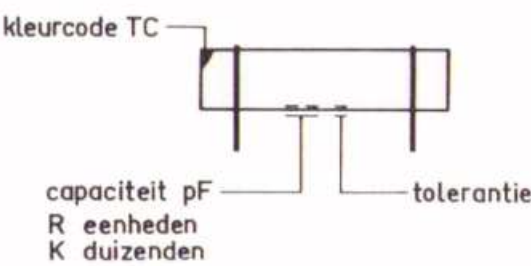
De condensatoren met een ϵ_r groter dan 250, veelal aangeduid als condensatoren met „high K ceramic” vertonen de volgende eigenschappen:

- de *TC* is bij deze condensatoren geen constante doch in grootte afhankelijk van de temperatuur.

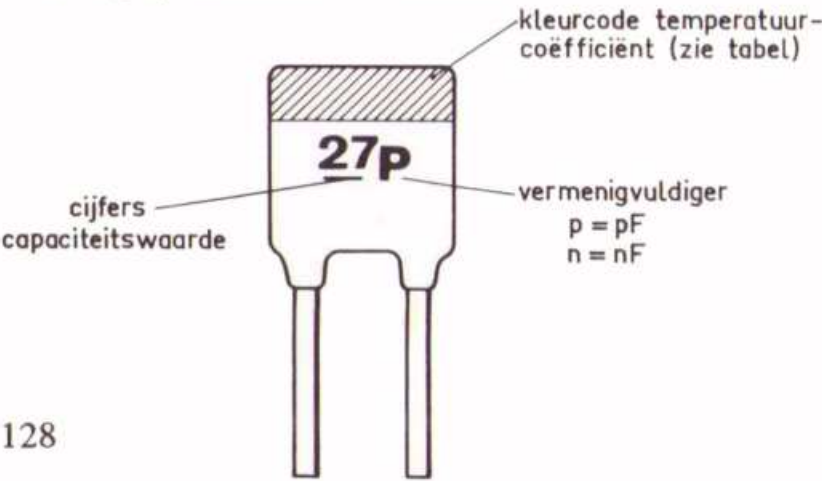
Kleurcode

Kleur	TC	Eerste	Tweede	Vermenig- vuldiger	Tolerantie $C \leq 10 \text{ pF}$	$C > 10 \text{ pF}$
rood/violet	P100					
zwart	NP0		0	1	$\pm 2 \text{ pF}$	$\pm 20\%$
bruin	N033	1	1	10	$\pm 0,1 \text{ pF}$	$\pm 1\%$
rood	N075	2	2	10^2	$\pm 0,25 \text{ pF}$	$\pm 2\%$
oranje	N150	3	3	10^3	—	$\pm 3\%$
geel	N220	4	4	10^4	—	—
groen	N330	5	5	10^5	$\pm 0,5 \text{ pF}$	$\pm 5\%$
blauw	N470	6	6	—	—	—
violet	N750	7	7	—	—	—
grijs	—	8	8	10^{-2}	$\pm 2,5 \text{ pF}$	—
wit	—	9	9	10^{-1}	$\pm 1 \text{ pF}$	$\pm 10\%$
oranje/oranje	N1500	↑	↑	↑	↑	
geel/oranje	N2200					
blauw/oranje	N4700					
zwart/oranje	N5600					

Gecombineerde kleur, cijfer, lettercode.

kleurcode TC	$C \leq 10 \text{ pF}$		$C > 10 \text{ pF}$	
	tol. (pF)	code	tol (%)	code
	$\pm 0,1$	B	± 1	F
	$\pm 0,25$	C	± 2	G
	$\pm 0,5$	D	± 5	I
	± 1	F	± 10	K
			± 20	M
			−20/+50	S
			−20/+100	Z

Codering op miniatuurcondensatoren



Voorbeelden:

0,47	pF = p 47
6,8	pF = 6 p 8
15	pF = 15 p
100	pF = n 10
2700	pF = 2 n 7
22000	pF = 22 n

- door de hoge waarde van ϵ_r is het mogelijk om een relatief grote capaciteit bij kleine afmetingen te verkrijgen.
- de stabiliteit is minder dan die van condensatoren met „low K ceramic”.
- de verliezen zijn wat groter.

Deze condensatoren lenen zich dus bij uitstek voor doeleinden waar een grote capaciteit wordt vereist en de eisen betreffende temperatuurgevoeligheid en stabiliteit niet al te hoog zijn, zoals dat het geval is bij koppel- en ontkoppelcondensatoren en bepaalde filters.

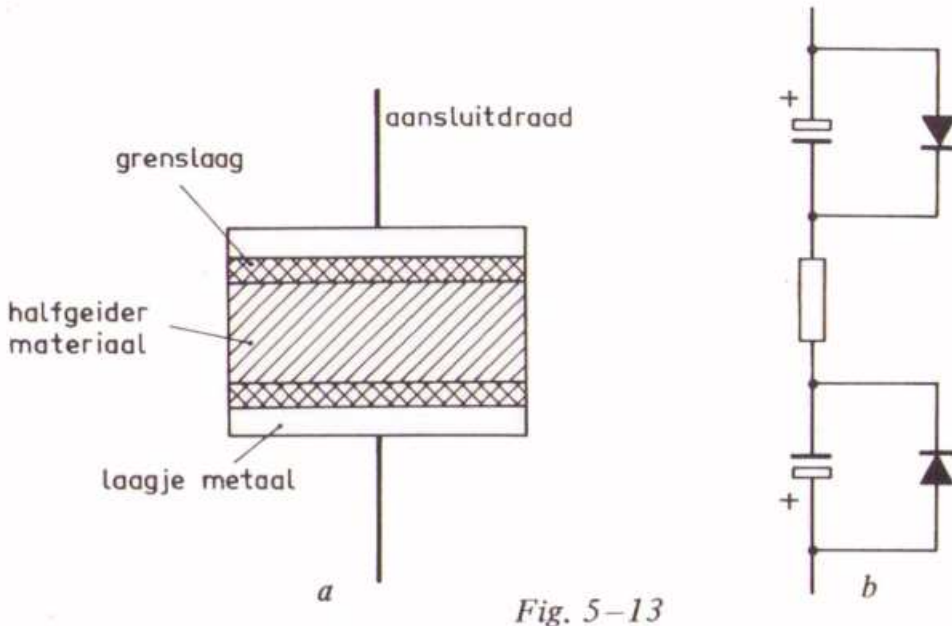


Fig. 5-13

De condensatoren behorende tot de derde groep bestaan uit een plaatje keramisch materiaal met halfgeleider eigenschappen. Het oppervlak van dit materiaal is geoxydeerd, waardoor een uiterst dunne sperlaag wordt gevormd (zie fig. 5-13a). In fig. 5-13b is het elektrisch vervangingschema van een dergelijke condensator afgebeeld. De werking berust op die van twee dioden, die zodanig zijn geschakeld dat één van deze dioden steeds geblokkeerd is. Om een indruk te geven: 100 000 pF; afmetingen $6 \times 7 \times 2,1$ mm. Toepassingen o.a. in hoorapparaten, oproepsystemen en andere mobiele apparatuur. De maximaal toelaatbare spanning is echter gering en bedraagt veelal slechts 6 V. De TC is slechts in een beperkt temperatuurgebied lineair.

5.7. Foliecondensatoren

Foliecondensatoren zijn in het algemeen wikkelcondensatoren, d.w.z. elektroden en diëlektricum zijn tezamen tot een pakket gewikkeld (zie fig. 5-14). De eigenschappen van deze condensatoren worden in eerste instantie dan ook bepaald door de soort diëlektricum dat is toegepast. Genoemd diëlektricum kan plastic dan wel papier zijn. Plastics die veel voor dit doel worden gebruikt zijn:

polyester, polycarbonaat, polystyreen en polypropyleen. Al deze plastics hebben gemeen dat de isolatieweerstand zeer hoog is (ca. $10^{17} \Omega \text{ cm}$), terwijl de relatieve diëlektrische constante varieert tussen 2 en 5 (zie onderstaande tabel).

De maximaal toelaatbare temperatuur wordt bepaald door het thermoplastische karakter van het diëlektricum en bedraagt voor de meeste soorten rond de 100°C . Bij veel uitvoeringen zijn de elektroden in de vorm van een dun laagje metaal

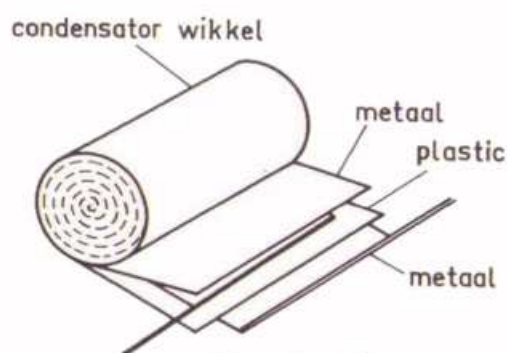


Fig. 5-14

Materiaal	ϵ_r	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	TC (ppm/ $^\circ\text{C}$)
polyester	3,1	10^{18}	+ 333
polystyreen	2,55	$> 10^{18}$	- 120
polycarbonaat	3,0	$> 10^{17}$	- 75
polypropyleen	2,2	10^{17}	- 200
cellulose tri-acetaat	4,5	10^{12}	+ 500

	Ring					
	1	2	3	4	5	
	kleur	cijfer	cijfer	vermenig-vuldiger	tolerantie	nominale spanning
1	zwart	—	0	1	$\pm 20\%$	125 V
2	bruin	1	1	10		
3	rood	2	2	100		250 V
4	oranje	3	3	1000		
5	geel	4	4	10 000		400 V
	groen	5	5	100 000		
	blauw	6	6	—		630 V
	violet	7	7	—		
	grijs	8	8	—		
	wit	9	9	—	$\pm 10\%$	

(veelal aluminium) op het diëlektricum aangebracht, waardoor het volume aanzienlijk kan worden gereduceerd. De dikte van het opgedampte metaal varieert veelal van 0,02 tot 0,05 μm . De gewikkelde condensator wordt vervolgens door isolatielak of hars beschermd tegen mechanische beschadiging en het indringen van vocht. Bij veel condensatoren worden capaciteit, tolerantie en nominale spanning aangegeven door middel van een kleurcode. Zie hiervoor de tabel op blz. 130.

In fig. 5–15 zijn enkele uitvoeringen van dit soort condensatoren afgebeeld.

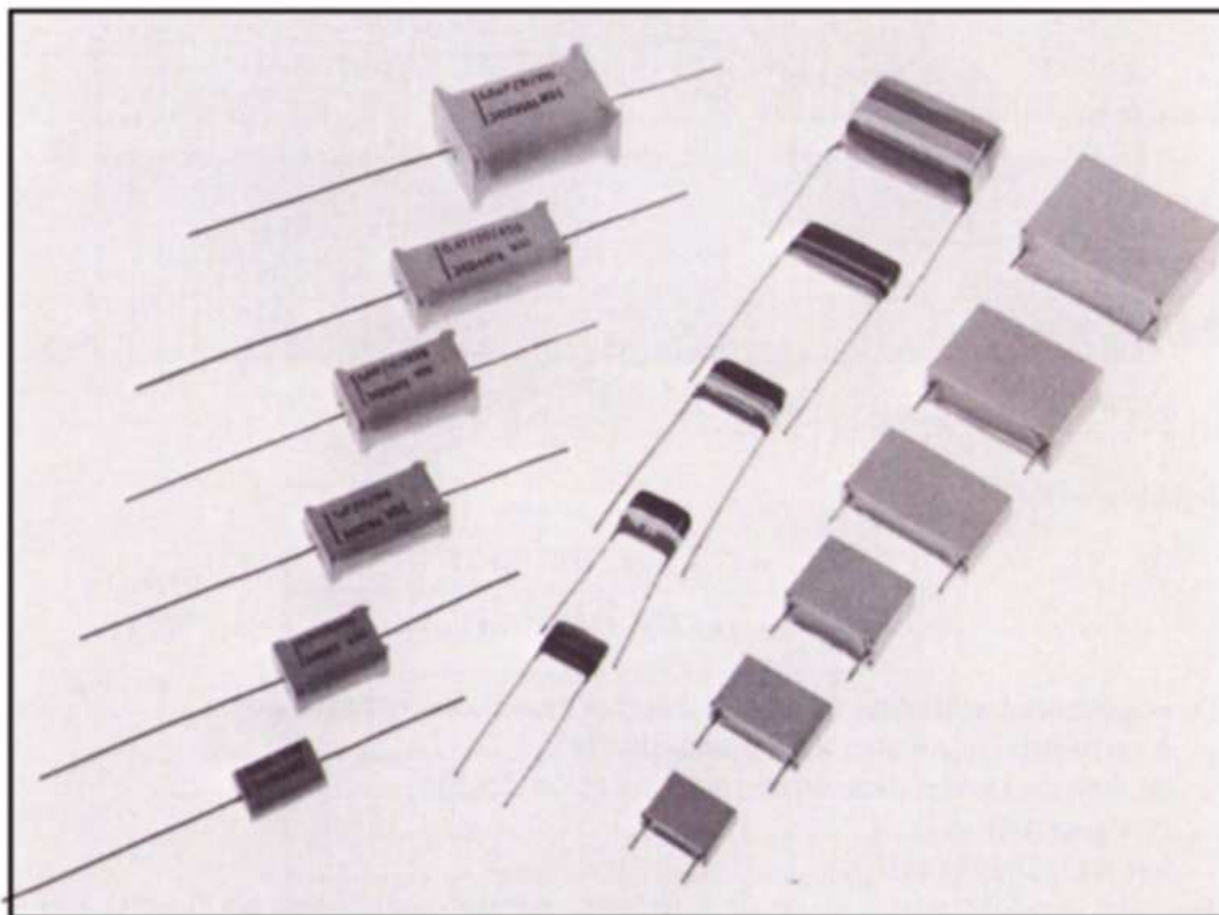


Fig. 5–15. Gemetalliseerde polycarbonaat.

5.7.1. Elektrische eigenschappen

In de catalogi worden een aantal elektrische waarden vermeld, waarvan allereerst zal worden nagegaan wat de betekenis hiervan is.

Een condensator kan worden vervangen door een serieschakeling van een ideale (verliesvrije) condensator en een gelijkstroomweerstand. Het vervangschema ziet er dus uit als afgebeeld in fig. 5–16.

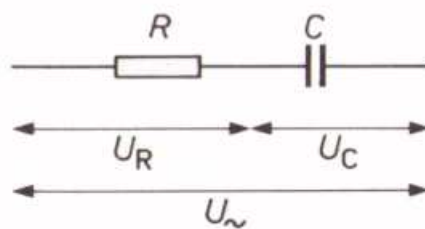


Fig. 5-16

Het vermogen dat in de weerstand in warmte wordt omgezet, bedraagt:

$$P = \frac{U_R^2}{R}$$

Verder is:

$$U_R^2 = \frac{R^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \cdot U_{\sim}^2$$

Bij benadering geldt:

$$U_R^2 = R^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot U_{\sim}^2$$

Substitutie geeft:

$$\begin{aligned} P &= R \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot U_{\sim}^2 \\ &= (RC) \cdot C \cdot \omega^2 \cdot U_{\sim}^2 \end{aligned}$$

De warmte-ontwikkeling in de condensator wordt dus bepaald door:

- de wisselspanning over de condensator ($U_{\sim}$),
- de frequentie van deze wisselspanning ($\omega = 2 \pi f$)
- de capaciteit (C),
- het RC produkt (ΩF).

Het RC produkt wordt door de fabrikant meestal aangegeven als functie van de frequentie (zie fig. 5-17).

Een andere grootheid is de dissipatiefactor $\text{tg} \delta$, die gelijk is aan:

$$\text{tg} \delta = \frac{R}{\frac{1}{\omega C}} = \omega \cdot R \cdot C$$

De temperatuurcoëfficiënt is meestal slechts over een bepaald temperatuurgebied lineair en wordt veelal gepubliceerd in de vorm van een grafiek als functie van de temperatuur. In fig. 5-18 is de relatie tussen $\text{tg} \delta$ en de temperatuur voor een polyester-condensator afgebeeld.

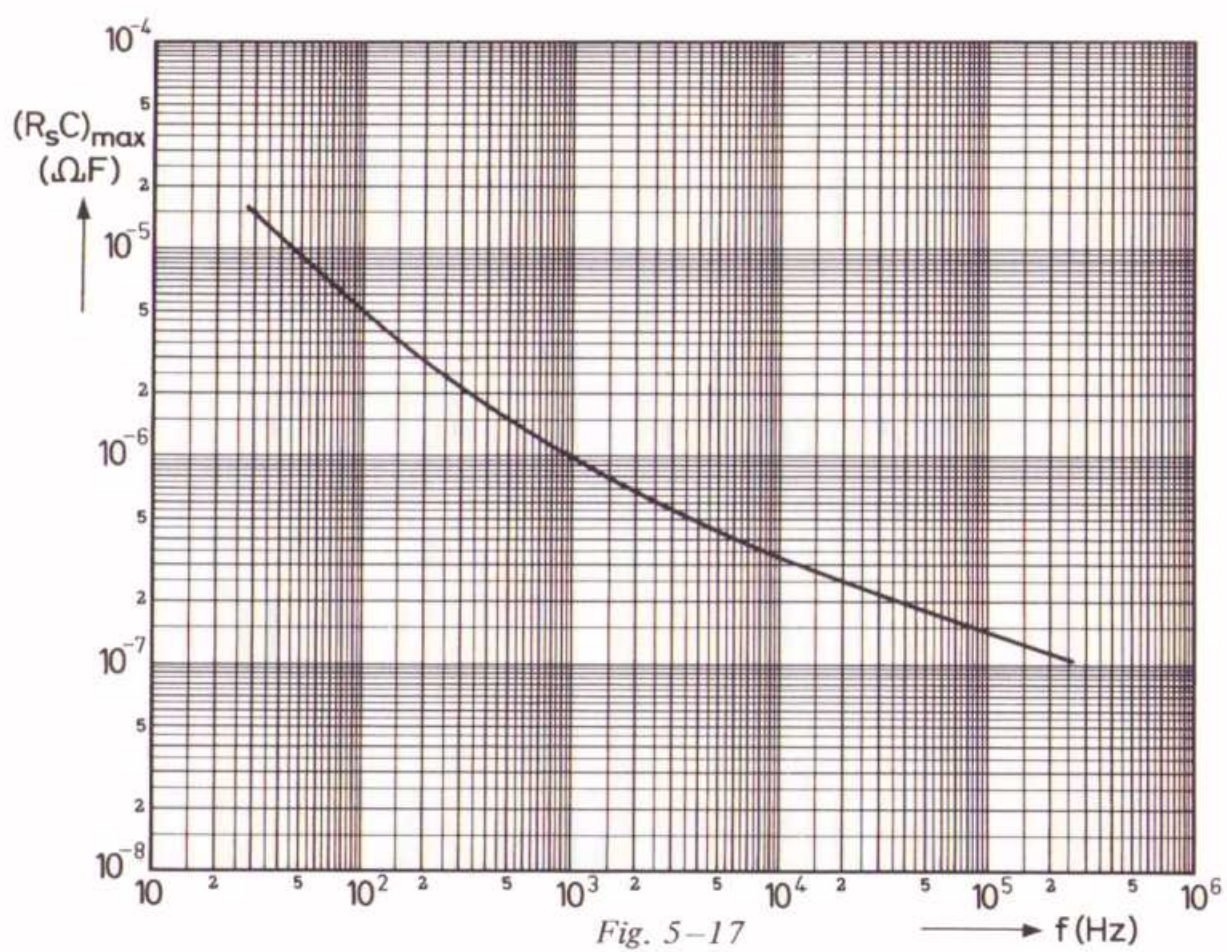


Fig. 5-17

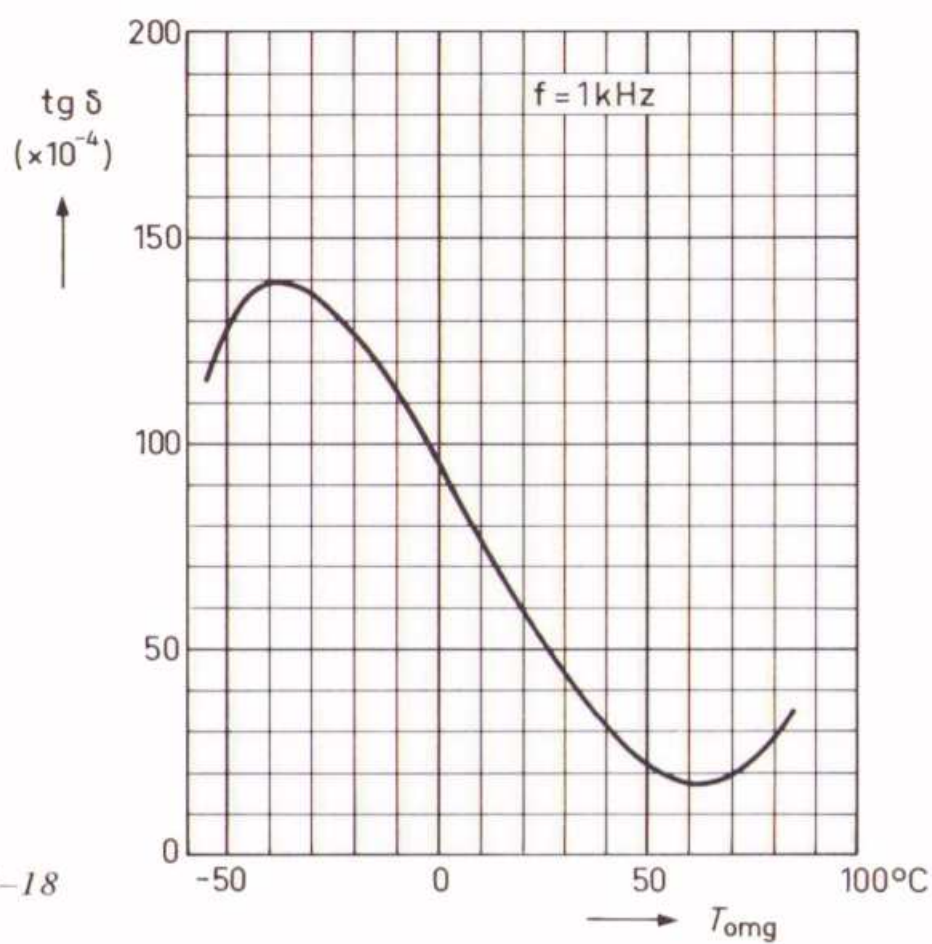


Fig. 5-18

5.8. Micacondensatoren

Dit zijn condensatoren waarbij mica als diëlektricum tussen de elektroden fungeert. Mica is een mineraal dat in verschillende soorten wordt aangetroffen. Voor bovenvermeld doel wordt hoofdzakelijk muscoviet gebruikt, dat in het Nabije Oosten en Zuid-Amerika wordt gedolven. Het is doorzichtig en heeft een gele, bruine dan wel groene kleur, dit afhankelijk van de streek waar het wordt gevonden.

Muscoviet bezit dermate goede elektrische eigenschappen dat het geen speciale chemische bewerkingen behoeft te ondergaan alvorens te kunnen worden verwerkt in de elektronische industrie. Een heel speciale eigenschap van dit materiaal is de splitsbaarheid in dunne plaatjes, die steeds evenwijdige zijden hebben. De minimum-dikte van een dergelijk plaatje bedraagt ongeveer $3\text{ }\mu\text{m}$. Enkele belangrijke eigenschappen van dit materiaal zijn:

Doorslagvastheid 3000–6000 V per 0,03 mm dikte.

Soortelijke weerstand $\approx 2 \cdot 10^{13}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$.

Diëlektrische constante 6,5–8,7.

Max. toelaatbare temperatuur $\approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dissipatiefactor $\delta \approx 0,0001$ voor HF-signalen;
 $\approx 0,001$ voor 50 Hz.

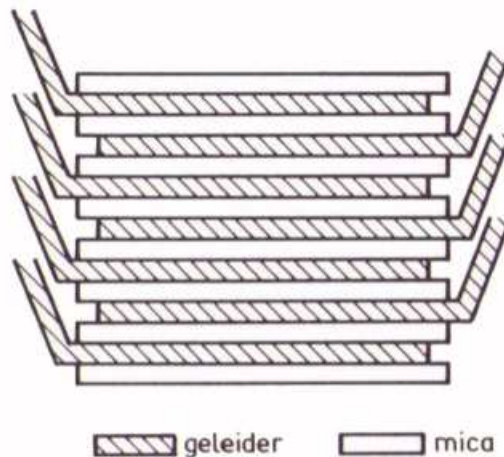


Fig. 5–19

De eenvoudigste uitvoering van een micacondensator bestaat uit het stapelen van geleiders en mica op een manier zoals afgebeeld in fig. 5–19. De condensator bestaat zodoende uit een parallelschakeling van een aantal condensatoren die worden gevormd door twee geleiders, gescheiden door een laagje mica. Zoals uit genoemde figuur blijkt, zijn de stroken geleidermateriaal aan de randen iets korter dan de mica-isolatie. Dit wordt gedaan om een eventuele overslag door onzuiverheden aan de oppervlakte van het mica te voorkomen. Bij de moderne konstrukties wordt de geleider in de vorm van een zilverlaag op het mica aangebracht. Het geheel wordt

daarna ondergebracht in een plastic- dan wel keramiekbehuizing. De condensatoren voor hogere spanningen, zoals die bijv. in zenders worden toegepast, zijn meestal niet ondergebracht in een behuizing. Micacondensatoren worden echter steeds meer vervangen door foliecondensatoren met een plastic diëlektricum.

5.9. Papiercondensatoren

Dit zijn vaste condensatoren waarbij geïmpregneerd papier als diëlektricum fungeert. De elektroden bestaan uit stroken metaalfolie (veelal aluminium) waarvan de dikte ongeveer 0,004 mm bedraagt. Het materiaal is zeer zuiver en vrij van vet en olie.

De te gebruiken papiersoort is van een speciale samenstelling (veelal natron-cellulose-papier) zodat het impregneermiddel goed wordt opgenomen.

De diëlektrische constante wordt dan ook in hoofdzaak bepaald door genoemd impregneermiddel. De eigenlijke fabricage, d.w.z. het tot een pakket wikkelen van de stroken metaalfolie en papier, geschiedt automatisch. De aldus gefabriceerde condensator wordt vervolgens beschermd tegen het binnendringen van vocht en mechanische beschadiging door:

1. Het gewikkelde pakket in een bepaalde vloeistof te dompelen en zodoende te voorzien van een beschermende laag (dompelcondensatoren).
2. Het pakket in een koker van geïmpregneerd papier, metaal of keramiek te schuiven (kokercondensatoren).
3. Het pakket in een metalen doos onder te brengen (dooscondensatoren).

In fig. 5-20 zijn enkele uitvoeringen van deze condensatoren afgebeeld.

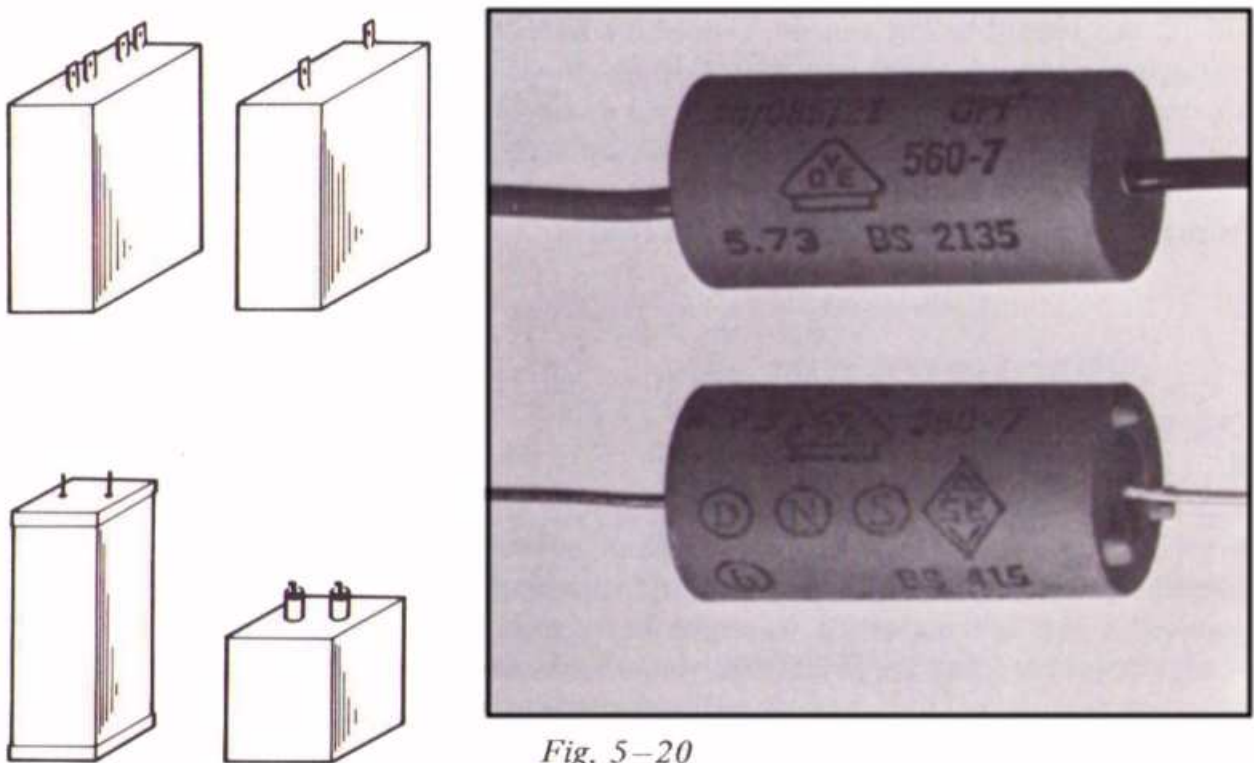


Fig. 5-20

Een bijzondere uitvoering vormen de zgn. gemetalliseerde papiercondensatoren. De stroken geïmpregneerd papier worden bij deze condensatoren in vacuüm voorzien van een zeer dun laagje metaal (zink of aluminium). Door deze bewerking zijn de stroken metaalfolie overbodig geworden waarmee een grote besparing aan volume wordt bereikt. Opmerkelijk is het herstellend vermogen na doorslag bij deze condensatoren. De reden hiervan is dat op de plaats van de doorslag het metaal over een grotere oppervlakte verdampt dan het papier verbrandt, zodat de kortsluiting vanzelf weer wordt opgeheven.

Bij deze condensatoren zijn de verliezen vrij groot en sterk afhankelijk van de frequentie. De verliezen zijn globaal te berekenen met de formule:

$$P = \delta \cdot \frac{U^2}{X_C}$$

Hierin is:

P de verliezen (W);

δ de dissipatiefactor;

U de effectieve waarde van de wisselspanning (V);

X_C capacitantie (Ω).

Opgemerkt zij nog dat de grootte van δ sterk afhankelijk is van de frequentie van de aangelegde wisselspanning.

De levensduur wordt in belangrijke mate bepaald door de temperatuur van de condensator en de grootte van de aangelegde spanning. In fig. 5—21 is het verband tussen de condensatortemperatuur in $^{\circ}\text{C}$ en de faktor waarmee de levensduur moet worden vermenigvuldigd, uitgezet. De gepubliceerde bedrijfstemperatuur is daarbij 85°C . Uit deze figuur blijkt dat een verlaging van de temperatuur van 85°C tot 75°C een verdubbeling van de levensduur betekent (aangenomen is hierbij dat de aangelegde spanning niet verandert). In fig. 5—22 is het verband aangegeven tussen de veranderingen van de levensduur t.o.v. de levensduur bij de nominale spanning. Uit deze grafiek blijkt dat wanneer de aangelegde spanning 0,9 (90%) van de nominale waarde is, de levensduur $1,7 \times$ groter wordt (170%). Bij benadering is dit verband vastgelegd door de volgende formule:

$$L_2 = L_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^5$$

Hierin is:

L_1 de levensduur bij een spanning U_1 ;

L_2 de levensduur bij een spanning U_2 .

De relatieve diëlektrische constante (ϵ_r) varieert meestal van 2,5—4 en is sterk afhankelijk van het materiaal waarmee het papier is geïmpregneerd. De maximaal toelaatbare spanning is afhankelijk van o.a. de dikte van het diëlektricum en kan worden opgevoerd door meerdere lagen papier tussen de stroken metaalfolie aan te brengen.

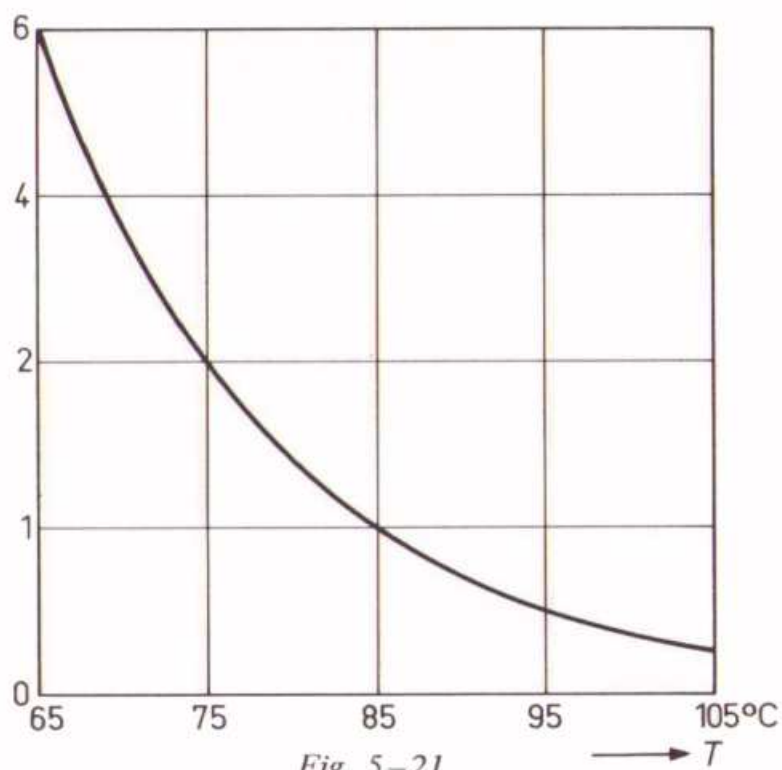


Fig. 5-21

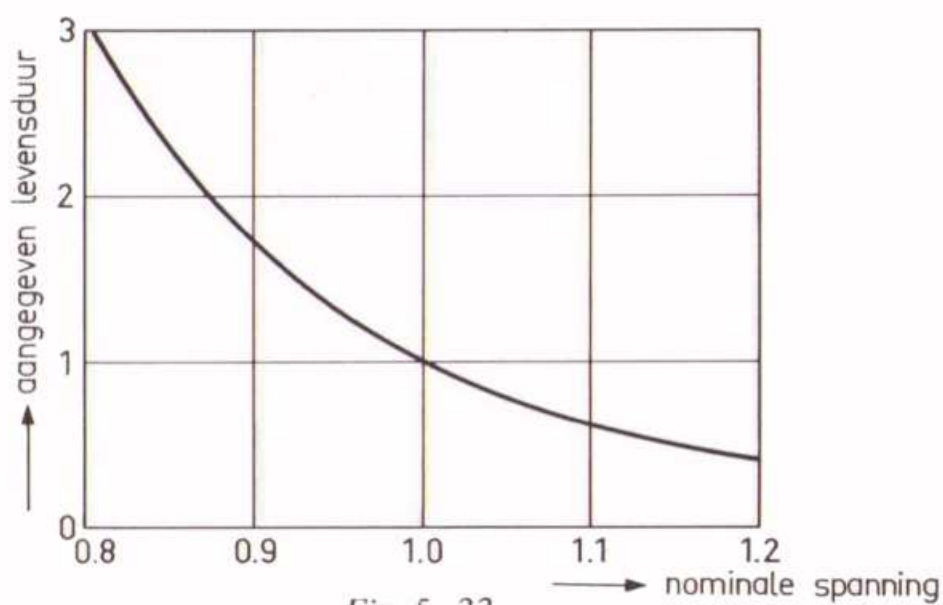


Fig. 5-22

Doordat de elektroden in rolvorm zijn gewikkeld en dus een spiraal vormen hebben de condensatoren een bepaalde zelfinductie die in sommige schakelingen (waarbij met hoge frequenties wordt gewerkt) niet meer kan worden verwaarloosd.

Toepassingsgebied. Ballastcondensator voor gasontladingslampen; aanloopmedium voor enkelfasige asynchrone motoren; verbetering van $\cos \varphi$ bij elektrische installaties.

Hoogspanningsuitvoering voor röntgen-installaties en hoogspanningsinstallaties. Telecommunicatie-apparatuur en daar waar anders bipolaire elektrolytische condensatoren zouden moeten worden toegepast (o.a. bij cross-over-filters van luidsprekersystemen).

Verder overal daar waar met lage frequenties wordt gewerkt.

Papiercondensatoren worden echter steeds meer verdrongen door de eerder beschreven kunststoffoliecondensatoren.

5.10. Instelbare condensatoren

Deze condensatoren, ook wel trimmers genoemd, worden met behulp van een schroevendraaier en in bepaalde gevallen met speciaal hulpgereedschap (trim sleutels) op de vereiste capaciteitswaarde ingesteld. Als algemene regel geldt dat het instelbare capaciteitsbereik relatief gering is en veelal in de orde van grootte van 1–12 pF of minder bedraagt. Het diëlektricum van de meest voorkomende soorten bestaat uit lucht, keramisch materiaal of bepaalde soorten plastics. In het eerste geval wordt gesproken van luchttrimmers, de tweede uitvoering wordt aangeduid als keramische trimmers, terwijl de plastic trimmers in een derde groep zijn verzameld.

In fig. 5–23 is een luchttrimmer afgebeeld, die in het verleden veel werd toegepast.

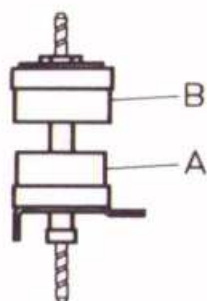


Fig. 5–23

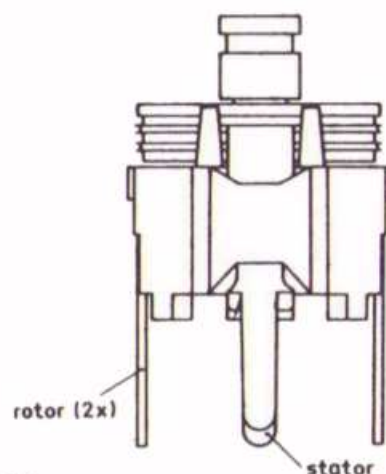
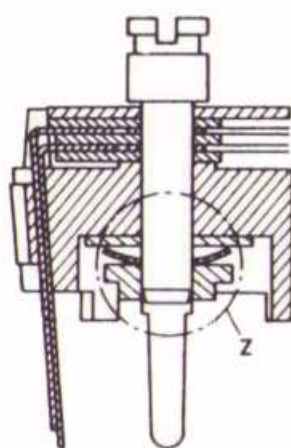


Fig. 5–24

De trimmer bestaat uit een stator (A in fig. 5-23) en een rotor. Eerstgenoemde elektrode wordt op het chassis of het betreffende paneel met gedrukte bedrading gemonteerd. De andere elektrode, de rotor (B), kan t.o.v. de stator worden verdraaid door middel van een asje dat is voorzien van schroefdraad met een grote spoed. Beide elektroden worden zodoende meer of minder in elkaar gedraaid, met als gevolg een toenemen resp. een afnemen van de capaciteit. Luchttrimmers hebben echter het nadeel dat de afmetingen veelal niet klein genoeg zijn voor de hedendaagse miniatuurtechniek en worden daarom vervangen door de beide andere soorten trimmers.

In fig. 5-24 zijn enkele uitvoeringen van veel toegepaste keramische en plastic film trimmers afgebeeld. Keramische trimmers worden geleverd met zowel een positieve als een negatieve temperatuurcoëfficiënt. De temperatuurcoëfficiënt van de plastic film trimmers is overwegend negatief.

Het toepassingsgebied van beide heeft betrekking op zowel UHF als VHF schakelingen.

5.11. Variabele condensatoren

Variabele condensatoren, ook wel afstemcondensatoren genoemd, bestaan in het algemeen uit een aantal vlakke dunne platen van aluminium of messing, die evenwijdig aan elkaar zijn opgesteld en waartussen een tweede stel evenwijdige platen wordt gedraaid of geschoven. De meest gangbare constructie is daarbij de draai-condensator. De beweegbare platen zijn bij deze constructie op een as gemonteerd en wel zodanig dat bij verdraaiing van deze as de platen in meer of mindere mate tussen de vaste platen worden geschoven.

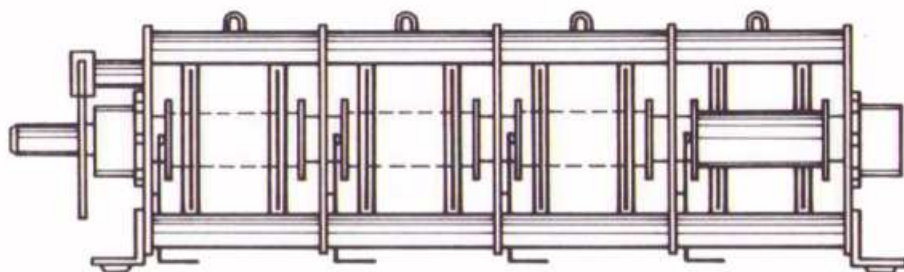


Fig. 5-25

De as met bijbehorende platen wordt gewoonlijk aangeduid als de rotor van de condensator. Het metalen chassis met de vaste platen, die daarin geïsoleerd zijn opgesteld, wordt de stator genoemd. Bij de meeste uitvoeringen is lucht het diëlektricum tussen beide elektroden. Er zijn echter ook uitvoeringen waarbij bepaalde soorten kunststof, zoals polyethyleen, als diëlektricum fungeren. De afmetingen van een dergelijke condensator kunnen in dat geval sterk worden gereduceerd.

In fig. 5-25 is een afstemcondensator afgebeeld, die in wezen is opgebouwd uit vier volkomen van elkaar gescheiden afstemcondensatoren die echter in één stator zijn ondergebracht en de afstemas gemeenschappelijk hebben.

Aan een dergelijke constructie worden hoge eisen gesteld die o.a. betrekking hebben op het bestand zijn tegen schokken en trillen, vandaar dat de as van de rotor meestal meermalen is gelagerd met kogeltjes van keramisch materiaal waardoor tevens de vereiste isolatie tussen stator en rotor wordt verkregen. Verder dienen hoge eisen te worden gesteld aan de symmetrie van de stator- en de rotorplaten.

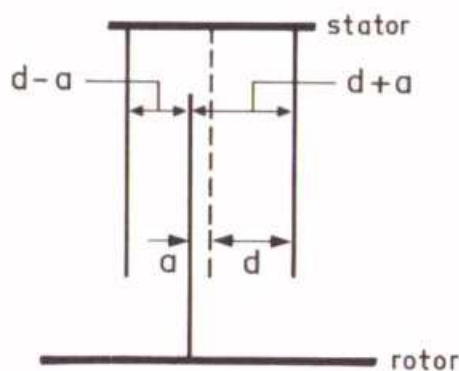


Fig. 5-26

In fig. 5-26 zijn twee statorplaten afgebeeld met daartussen een rotorplaat. Een dergelijke toestand is te beschouwen als een parallelschakeling van twee condensatoren, want de beide statorplaten zijn onderling geleidend verbonden en hebben zodoende dezelfde potentiaal. De rechter condensator bezit een werkzame oppervlakte van $S \text{ m}^2$, terwijl de afstand tussen de rotor- en rechter statorplaat $(d + a)$ meter bedraagt. De rotorplaat bevindt zich in deze toestand dus niet in het midden tussen de beide statorplaten. Van de linker condensator is de werkzame plaatoppervlakte eveneens $S \text{ m}^2$, terwijl de afstand tussen de rotor- en de linker statorplaat $(d - a)$ meter is.

De totale capaciteit van het geheel is zodoende:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_o \frac{S}{(d + a)} + \epsilon_r \epsilon_o \frac{S}{(d - a)}$$

Aangezien $\epsilon_r \approx 1$, kan deze formule worden vereenvoudigd tot:

$$\begin{aligned} C &= \epsilon_o S \left\{ \frac{1}{d + a} + \frac{1}{d - a} \right\} \\ &= \epsilon_o S \frac{2d}{d^2 - a^2} \end{aligned}$$

Bevindt de rotorplaat zich precies in het midden tussen beide statorplaten, dan is $a = 0$ en wordt de vervangcapaciteit

$$C_0 = \epsilon_0 S \frac{2}{d}$$

De invloed van de asymmetrie op de capaciteit volgt uit het verband:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2}$$

Als $a = 0$, wordt de verhouding $\frac{C}{C_0} = 1$. Is daarentegen $\frac{a}{d} = \frac{1}{2}$ dan is $\frac{C}{C_0} = 1\frac{1}{3}$ ofwel $C = 1\frac{1}{3} C_0$, m.a.w. de totale capaciteit is met een derde toegenomen. De richting van de afwijking (a) beïnvloedt de verhouding niet. In fig. 5–27 is een grafiek afgebeeld die het capaciteitsverloop als functie van de verschuiving uit het midden van de beide statorplaten weergeeft. Uit het bovenstaande volgt dat het niet noodzakelijk is dat de beweegbare platen precies in het midden tussen de statorplaten zijn aangebracht. Aangenomen dat de spanning tussen de platen hierbij geen rol speelt.

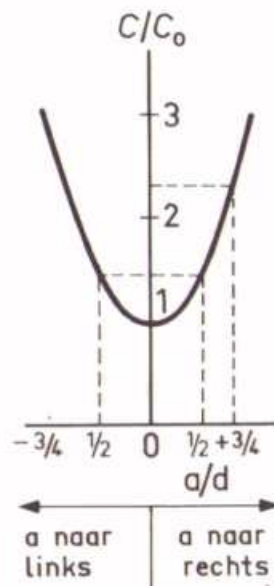


Fig. 5–27

5.17.1. Het capaciteitsverloop

Hieronder wordt de verandering van de capaciteit als functie van de hoekverdraaiing van de rotor verstaan. Genoemd verloop kan zijn:

- lineair
- logaritmisch

Een lineaire afstemcondensator (zie fig. 5–28) is voorzien van halfcirkelvormige

rotorplaten. De vorm van de statorplaten is daarbij van secundair belang, met dien verstande dat de rotorplaten bij de stand „maximaal” zich geheel tussen de statorplaten moeten bevinden. In veel gevallen worden nog speciale eisen gesteld voor wat betreft de nulcapaciteit. Onder de nulcapaciteit wordt de resterende capaciteit verstaan bij volledig uitgedraaide rotorplaten. Het zal duidelijk zijn dat naarmate de condensator meer platen bevat en dus groter is, ook de nulcapaciteit toeneemt. Zo heeft een condensator met een variabel capaciteitsbereik van 25 pF een nulcapaciteit van 8,5 pF en een van 200 pF een nulcapaciteit van 11,5 pF.

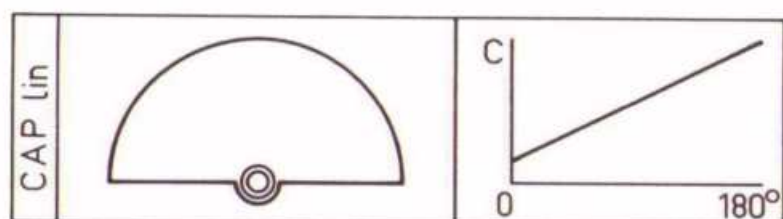


Fig. 5–28

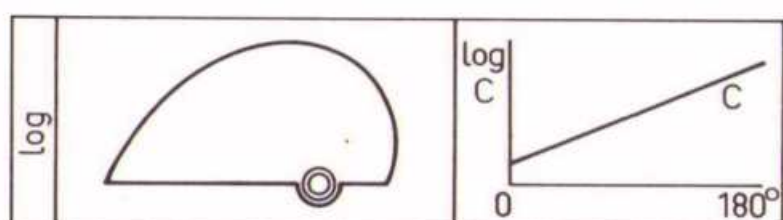


Fig. 5–29

Bij de logaritmische afstemcondensatoren bezitten de rotorplaten een zodanige vorm dat de verdraaiingshoek van de rotor evenredig is met de logaritme van de capaciteitsverandering. In fig. 5–29 is de vorm van de rotorplaten afgebeeld.

Tegenwoordig wordt vooral in de draagbare radio-ontvangers veelvuldig gebruik gemaakt van condensatoren met een diëlektricum van kunststof. Deze condensatoren die een vrijwel lineair capaciteitsverloop hebben, kunnen zeer compact worden gebouwd (bijv. $20 \times 20 \times 15$ mm). Vermeld zij nog dat bij zeer hoge frequenties (bijv. TV- en FM-signalen) variabele capaciteitsdioden als afstemcondensator worden toegepast. Voor een beschrijving van deze dioden wordt verwezen naar het desbetreffende hoofdstuk in het boek „Actieve componenten”.

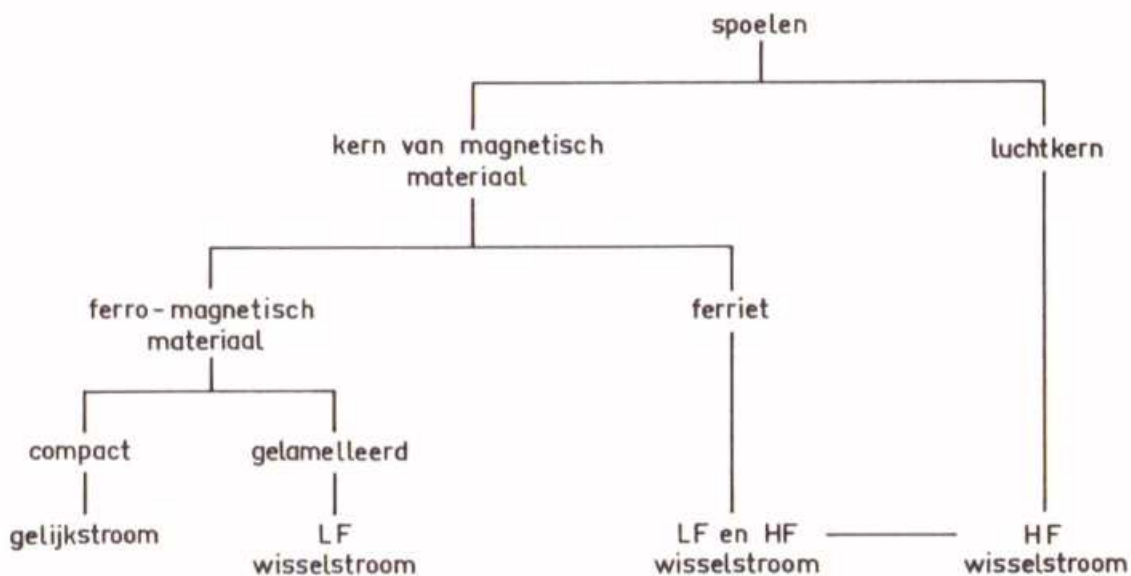
6. Spoelen en transformatoren

6.1. Overzicht en indeling

Spoelen worden in de elektronica in zeer grote verscheidenheid toegepast, doch verdienen een aparte plaats aangezien deze onderdelen veelal door de gebruiker zelf worden gefabriceerd en dus niet ingekocht.

Enkele toepassingen zijn:

- transformatoren (HF en LF)
- smoorspoelen (idem)
- deflectiespoelen voor beeldbuizen
- inbouwantennes voor radio-ontvangers
- magneetkoppels voor toonbandapparatuur
- relais
- luidsprekerspoelen
- magnetische geheugens voor computers



Overzicht 6-1

De gestelde eisen lopen sterk uiteen en zijn veelal gericht op de toepassing waarvoor de spoel is geconstrueerd, de vereiste veiligheid en de betrouwbaarheid.

Bij al deze toepassingen zijn de spoelen, samengesteld uit geïsoleerd draad (wikkel-draad of litzedraad) en een kern van magnetisch materiaal of lucht.

Het belangrijkste gegeven van een spoel is de coëfficiënt van zelfinductie (L). Voor een lange dunne spoel bedraagt deze bij benadering:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 A n^2}{l}$$

Hierin is:

L de coëfficiënt van zelfinductie (H);

μ_r de relatieve permeabiliteit;

μ_0 de absolute permeabiliteit ($4 \pi \cdot 10^{-7}$ Wb/Am);

A de doorsnede van de spoel (m²);

n het aantal windingen;

l de lengte van de spoel (m).

In het algemeen kan dus worden gesteld dat de coëfficiënt van zelfinductie wordt bepaald door de soort materiaal dat als kern fungeert (μ_r), de afmetingen van de spoel en het aantal windingen. Naar gelang de grootte van μ_r is de volgende indeling van het kernmateriaal te maken:

$\mu_r < 1$ diamagnetische materialen (bijv. koper = 0,99999 en bismut = 0,99984)

$\mu_r \geq 1$ paramagnetische materialen (bijv. lucht = 1,0000004 en platina = 1,00022)

$\mu_r \gg 1$ ferromagnetische materialen en ferrieten.

Voor de ferrieten hebben in de moderne elektronica grote ingang gevonden omdat ze ook bij wisselstromen met hoge frequenties zijn te gebruiken. Dit betekent dat de afmetingen drastisch kunnen worden verkleind t.o.v. spoelen met een luchtkern. Veel firma's brengen ferrieten onder eigen handelsmerk op de markt. Bekende namen zijn Ferroxcube (Philips) en Siferit (Siemens). Bij wisselstromen met lage frequenties (speciaal bij 50 Hz) wordt de voorkeur gegeven aan een kern van ferromagnetisch materiaal vanwege de grote waarden van μ_r , terwijl bij wisselstromen met hogere frequenties overwegend ferriet in aanmerking komt. Opgemerkt dient nog te worden dat elke fabrikant van dit materiaal een heel assortiment met uiteenlopende eigenschappen produceert.

Ferrieten zijn verbindingen van ijzeroxyde met andere metalen zoals nikkel, zink, molybdeen, etc. Mechanisch gezien hebben ze de eigenschappen van keramiek en worden dan ook in de betreffende vorm geperst en gesinterd. De specifieke weerstand van ferromagnetische materiaal is klein en varieert veelal van 10^{-7} tot $10^{-5} \Omega\text{m}$. Bij ferriet is deze materiaalgrootte aanzienlijk groter en varieert veelal tussen 1 en $10^5 \Omega\text{m}$.

Dit laatste betekent dat de wervelstroomverliezen in de kern zijn te verwaarlozen. Een kern van ferriet is dan ook massief, dit in tegenstelling tot een kern van ferromagnetisch materiaal, die vanwege de wervelstroomverliezen is samengesteld uit lamellen, d.w.z. uit dunne plaatjes die onderling van elkaar zijn gescheiden door een dun laagje plastic, papier of lak. Als ferromagnetisch materiaal wordt daarbij overwegend silicium ijzer (dynamoblifo) toegepast.

In de volgende tabel is μ_r , van enkele veel gebruikte materialen afgedrukt.

Materiaal	Samenstelling	μ_r
Weekijzer	—	≤ 5000
Kobalt	—	≤ 240
Nikkel	—	≤ 600
μ -metaal	Ni/Cr/Mo/Cu	≤ 200.000
Hard permalloy	Ni/Mo/Nb/Ti	≤ 100.000
Supermalloy	Ni/Fe/Mo	≤ 800.000
Alperm	Al/Fe	≤ 55.000
Sendust	Al/Si/Fe	≤ 120.000
Ferriet	Mn/Zn/oxyden	≤ 40.000

6.2. Enkele spoelen met luchtkern

In het nu volgende wordt voor enkele spoelsoorten aangegeven hoe de zelfinductie is te berekenen. Opgemerkt wordt dat het hier zeer vaak gaat om empirische formules die een zo groot mogelijke benadering geven. Als kern is steeds lucht gekozen, tenzij anders is vermeld.

1. De zelfinductie van een solenoïde met ronde draad.

De zelfinductie is te berekenen met de formule:

$$L = F \cdot \frac{d}{2,5} \cdot n^2 \quad (\mu\text{H})$$

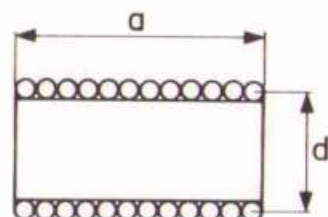


Fig. 6-1

F is een constante, waarvan de grootte wordt bepaald door de verhouding:

$$\frac{\text{diameter}}{\text{lengte}} \quad (d/a)$$

Hierin is:

d de diameter van de spoel in cm.

n het aantal windingen.

a de lengte van de spoel in cm.

d/a	F	d/a	F
0,5	0,01026	3,5	0,03461
1	0,01726	4	0,03665
1,5	0,02238	4,5	0,03846
2	0,02635	5	0,04009
2,5	0,02957	6	0,04293
3	0,03228	7	0,04534
		8	0,04745
		9	0,04931
		10	0,05097

2. De zelfinductie van een spoel met meer lagen.

De zelfinductie van een cilindrische spoel met rechthoekige doorsnede kan worden berekend met de formule:

$$L = n^2 \cdot d \cdot F \text{ nH}$$

Hierin is:

n het aantal windingen

$d = \frac{1}{2} (D_i + D_u)$

F een constante waarvan de grootte wordt bepaald door de afmetingen.

$$F = \frac{20 D_i}{D_u + 2 l} = \frac{20 \left(\frac{D_i}{D_u} \right)}{1 + (2 l / D_u)}$$

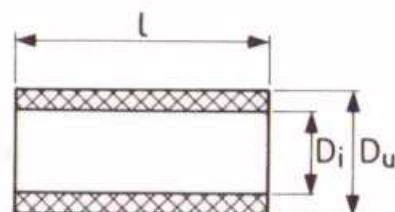


Fig. 6-2

alle maten in cm.

3. De zelfinductie van een cirkelvormige winding van ronde draad.

$$L = 2 \pi D \left\{ \ln \frac{D}{d} + 0,33 \right\} \text{ nH.}$$

$(D \gg d)$

Hierin is:

D de diameter van de cirkel (cm);

d de draaddiameter (cm)

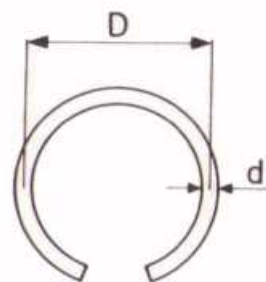


Fig. 6-3

4. De zelfinductie van een vierkante winding.

$$L = 8 l \left(\ln \frac{2 l}{d} - 0,524 \right) \text{ nH } (d \ll l)$$

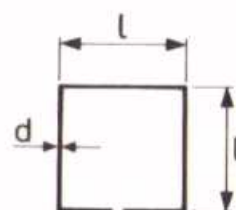


Fig. 6-4

Hierin is:

l de lengte van een zijde van het vierkant (cm);

d de draaddiameter (cm).

5. De zelfinductie van een toroïde.

$$L = \frac{\pi d^2 n^2}{2 D} \text{ nH}$$

Hierin is:

d de draaddiameter (cm);

D de spoeldiameter (cm);

n het aantal windingen.

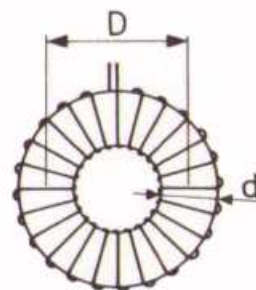


Fig. 6-5

6. De zelfinductie van een toroïde met rechthoekige doorsnede.

$$L = 0,0294 n^2 h \log \frac{d_2}{d_1} \mu\text{H}$$

Hierin is:

n het aantal windingen;

h de hoogte van de doorsnede (cm);

d_2 de buitendiameter (cm);

d_1 de binnendiameter (cm).

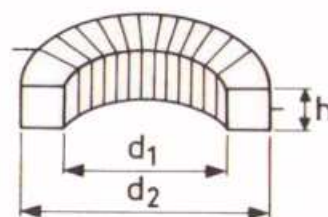


Fig. 6-6

7. De zelfinductie van een concentrische leiding.

$$L = \frac{l}{2 \pi} \ln D_2/D_1 \text{ nH/cm}$$

Hierin is:

l de lengte (cm);

D_2 de binnendiameter van de buitengeleider (cm)

D_1 de buitendiameter van de binnengeleider (cm).

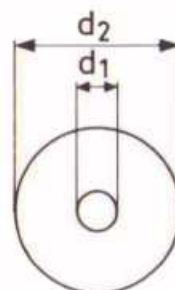


Fig. 6-7

6.3. HF- en MF-spoelen met ferrietkern

Voor HF- en MF-spoelen en transformatoren wordt tegenwoordig overwegend ferriet als kernmateriaal gebruikt. Het is dan mogelijk om met betrekkelijk weinig windingen een relatief grote zelfinductie te verkrijgen. Door de fabrikanten van ferrieten wordt voor het kernmateriaal, waarvan de afmetingen internationaal zijn gestandaardiseerd, steeds de relatie tussen het aantal windingen en de coëfficiënt van zelfinductie vermeld.

$$n = \alpha \sqrt{L}$$

Hierin is:

n het aantal windingen;

L de coëfficiënt van zelfinductie in mH;

α een materiaalconstante, waarvan de grootte wordt bepaald door de soort kernmateriaal en de afmetingen.

Bedraagt $\alpha = 96$ en bevat de spoel 100 windingen, dan is de zelfinductie als volgt te berekenen:

$$L = \left(\frac{n}{\alpha}\right)^2 = 1,09 \text{ mH}$$

Van een onbekende spoelkern is de factor α te bepalen door bijv. 100 windingen aan te brengen en vervolgens L te meten.

De dikte van de draadsoort is in de meeste gevallen niet kritisch en wordt bepaald door de beschikbare ruimte. Enkele veel gebruikte waarden zijn litzedraad van $20 \times 0,05 \text{ mm}$ en wikkeldraad van 0,1 tot 0,5 mm. De spoelhouder is meestal van polycarbonaat, een materiaal met geringe verliezen, ook bij hoge frequenties.

6.4. Transformatoren

In een transformator worden twee of meer stroomketens met elkaar verbonden door een magnetisch veld. Galvanisch zijn genoemde ketens meestal volledig van elkaar gescheiden. In fig. 6–8 is schematisch een dergelijke transformator afgebeeld. Het geheel bestaat uit een metalen juk waarop twee of meer spoelen zijn aangebracht.

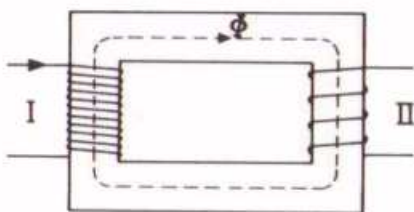


Fig. 6–8

In de figuur is spoel I opgenomen in de keten waarin zich ook de stroom of spanningsbron bevindt. Deze spoel wordt aangeduid als de primaire wikkeling. De spoel II wordt in dat geval aangeduid als de secundaire wikkeling. Beide spoelen omvatten de magnetische flux Φ in het juk die wordt teweeggebracht door de primaire spoel.

Bij de moderne transformatoren worden de desbetreffende wikkelingen over elkaar gelegd met alleen één of meer lagen isolatiemateriaal ertussen.

De werking en controle van transformatoren wordt in veel boeken over elektriciteitsleer uitvoerig behandeld, zodat in het nu volgende alleen het ontwerp van kleine transformatoren wordt beschreven.

Berekening van een voedingstransformator.

Exacte berekeningen zijn alleen mogelijk als de magnetische eigenschappen van het te gebruiken kernmateriaal bekend zijn. Is dit niet het geval, dan is de transformator echter toch met vrij grote nauwkeurigheid als volgt te berekenen.

Allereerst wordt het vermogen bepaald dat secundair maximaal wordt afgenomen.

(P_{sec}) .

$P_{\text{sec}} = \Sigma \text{spanning} \times \text{stroom} \times \text{secundaire vormfactor } (E_{\text{sec}})$.

Soort belasting	Vorm factor	
	secundair E_{sec}	primaire E_{pr}
Zuivere ohmse belasting	1	1
Bruggelijkrichter met cap. bel.	1,5 – 3	1,5 – 3
Bruggelijkrichter met ohmse of induct.bel.	1,11	1,11
Dubbele gelijkrichter met cap. bel.	2 – 4	1,5 – 3
Dubbele gelijkrichter met ohmse of induct.bel.	1,57	1,11

De hogere waarden van de vormfactor gelden voor grotere transformatoren met gering spanningsverlies; de lagere waarden voor kleinere transformatoren met groter spanningsverlies.

Het opgenomen vermogen is gelijk aan het secundaire vermogen berekend met de primaire vormfactor ($P_r = \Sigma \text{spanning} \times \text{stroom} \times F_{\text{pr}}$), vermeerderd met de verliezen. Deze verliezen bedragen voor kleinere transformatoren 15–20% van het vermogen en voor grotere uitvoeringen 5–10%. Globaal is het opgenomen vermogen dus $P_{\text{pr}} = 1,2 P_{\text{sec}}$ waarbij P_{sec} is berekend met de primaire vormfactor.

Het gemiddelde vermogen bedraagt $P_{\text{gem}} = \frac{1}{2} (P_{\text{pr}} + P_{\text{sec}})$.

De kerndoorsnede A wordt nu bepaald met de vuistregel $A = 1,25\sqrt{P_{\text{gem}}}$. Aan de hand van A wordt vervolgens het vereiste blikpakket gekozen waarbij A naar boven wordt afgerond.

Het aantal windingen per volt is te berekenen met $n/V = \frac{50}{A \cdot B}$.

Hierin is: n/V = het aantal windingen per volt.

A = de kerndoorsnede in cm^2 .

B = de maximale magnetische inductie in tesla.

Hierbij wordt een ijzervulfactor van ca. 90% in rekening gebracht.

Voor kleine transformatoren bedraagt B 1,1 à 1,2 tesla en voor grotere transformatoren 0,8 – 1 tesla.

Het aantal windingen moet nu nog worden gecorrigeerd met betrekking tot het spanningsverlies in het koperdraad. Om bij belasting de juiste kerninductie te verkrijgen wordt het aantal primaire windingen per volt verminderd met de helft van het koperverlies en het aantal secundaire windingen per volt vermeerderd met de helft van hetzelfde percentage.

Voor kleine transformatoren bedragen deze verliezen ongeveer 10 à 15% van het vermogen.

De vereiste draaddoorsnede per wikkeling (spoel) is te berekenen uit het vermogen en de toegelaten stroomdichtheid.

Voor kleine transformatoren bedraagt de toegelaten stroomdichtheid veelal 2,5 à 3,5 A/mm^2 . Is eenmaal de draaddoorsnede en het aantal windingen bekend dan is

de benodigde wikkelruimte gemakkelijk te berekenen, waarbij rekening moet worden gehouden met het feit dat de draden geïsoleerd zijn. Dus werken met de buitendiameter.

De benodigde wikkelruimte is dan: aantal windingen $\times$ (draaddikte)² vermeerderd met de ruimte die wordt ingenomen door het benodigde isolatie-materiaal tussen de wikkelingen etc. Voor dit laatste moet de berekende ruimte $n \cdot d^2$ met ca. 90% worden vermeerderd.

Bij wijze van voorbeeld volgt thans de berekening van een voedingstransformator met de volgende gegevens:

Primaire spanning: 220 V

Secundaire spanningen: 6,3 V/3 A en 4 V/1 A, 2×280 V voor dubbelzijdige gelijkrichter met capacatieve ingang ($F_{\text{sec}} = 2$; $F_{\text{pr}} = 1,4$).

Gelijkspanning 300 V/60 mA.

$$\begin{array}{rcl} \text{Nu is } P_{\text{sec}} = 300 & \cdot 0,06 & \cdot 2 = 36 \\ & 6,3 \cdot 3 & \cdot 1 = 18,9 \\ & 4 & \cdot 1 \quad \cdot 1 = \underline{4} + \\ & & 58,9 \text{ VA} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} P_{\text{pr}} = 300 & \cdot 0,06 & \cdot 1,4 = 25 \\ & 6,3 \cdot 3 & \cdot 1 = 18,9 \\ & 4 & \cdot 1 \quad \cdot 1 = \underline{4} + \\ & & 47,9 \text{ VA} \end{array}$$

De verliezen in de transformator worden geschat op 20% van $P_{\text{pr}} = 9,6$ VA; zodat P_{pr} totaal = $47,9 + 9,6 = 57,5$ VA

$$P_{\text{gem}} = \frac{1}{2} (58,9 + 57,5) = 58 \text{ VA}$$

De kerndoorsnede van de transformator moet minimaal $A = 1,25\sqrt{58} = 9,5 \text{ cm}^2$ zijn.

De afmetingen van transformatorblik zijn gestandaardiseerd, zodat een passende kerndoorsnede moet worden gekozen, waarbij A naar boven wordt afgerond. Gekozen wordt de M kern 85/32. Voor deze kern bedraagt $P_{\text{max}} = 70$ VA.

Het aantal wikkelingen per volt (n/V) bedraagt voor een netfrequentie van 50 Hz en een magnetische inductie van 1,2 tesla:

$$n/V = \frac{50}{1,2 \cdot 9,5} = 4,25.$$

De koperverliezen bedragen rond 14%, zodat het aantal windingen per volt aan de primaire zijde $4,25 - 7\% = 3,95$ en aan de secundaire zijde $4,25 - 7\% = 4,55$ is. Het aantal windingen van de desbetreffende spoelen zijn:

$$\begin{aligned}
 n_{\text{pr}} &= 220 \cdot 3,95 = 870 \\
 n_{2 \times 280} &= 2 \cdot 280 \cdot 4,55 = 2 \times 1300 \\
 n_{6,3} &= 6,3 \cdot 4,55 = 29 \\
 n_4 &= 4 \cdot 4,55 = 18
 \end{aligned}$$

Door de primaire wikkeling vloeit een stroom van $57,5/220 = 260 \text{ mA}$, terwijl de secundaire wikkeling, die een spanning van $2 \times 280 \text{ V}$ levert, een stroom voert van $P_{\text{sec}}/V = 36/560 = 64 \text{ mA}$.

Bepaling van de draaddiameter (wikkeldraad).

Als stroomdichtheid wordt gesteld $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$, zodat:

stroom	draaddiameter
0,26 A	0,35 mm (uitwendig 0,43 mm)
0,064 A	0,18 mm (uitwendig 0,24 mm)
3 A	1,25 mm (uitwendig 1,39 mm)
1 A	0,7 mm (uitwendig 0,83 mm)

De benodigde ruimte om de wikkelingen en isolatie onder te brengen bedraagt

$$\begin{aligned}
 870 \cdot 0,43^2 &= 1,65 \text{ cm}^2 \\
 2600 \cdot 0,24^2 &= 1,50 \text{ cm}^2 \\
 29 \cdot 1,39^2 &= 0,60 \text{ cm}^2 \\
 18 \cdot 0,83^2 &= 0,15 \text{ cm}^2 + \\
 &3,9 \text{ cm}^2 \\
 \text{voor isolatie 75\%} &= 2,9 \text{ cm}^2 \\
 \text{voor spoelkoker 15\%} &= 0,60 \text{ cm}^2 + \\
 \text{Totaal} &= 7,4 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

Aangezien kernblik M 85/32 een wikkelruimte van $7,6 \text{ cm}^2$ bezit, is de transformator hiermede dus berekend.

De vorm van het transformatorblik is gestandaardiseerd tot M-, E1- en U1-pakketten, waarbij de M-uitvoering zich niet leent voor massafabricage vanwege het lastige insteken. Tegenwoordig wordt de kern veelal machinaal gewikkeld uit dunne gewalste banden. Na het wikkelen wordt de kern in hardende harsen gedrenkt, gehard en vervolgens gedeeld, waardoor bij het samenstellen een kleine luchtspleet wordt verkregen. De strooiverliezen zijn bij deze transformatoren, die in grote aantallen worden gefabriceerd, gering.

6.5 Enkele speciale transformatoren

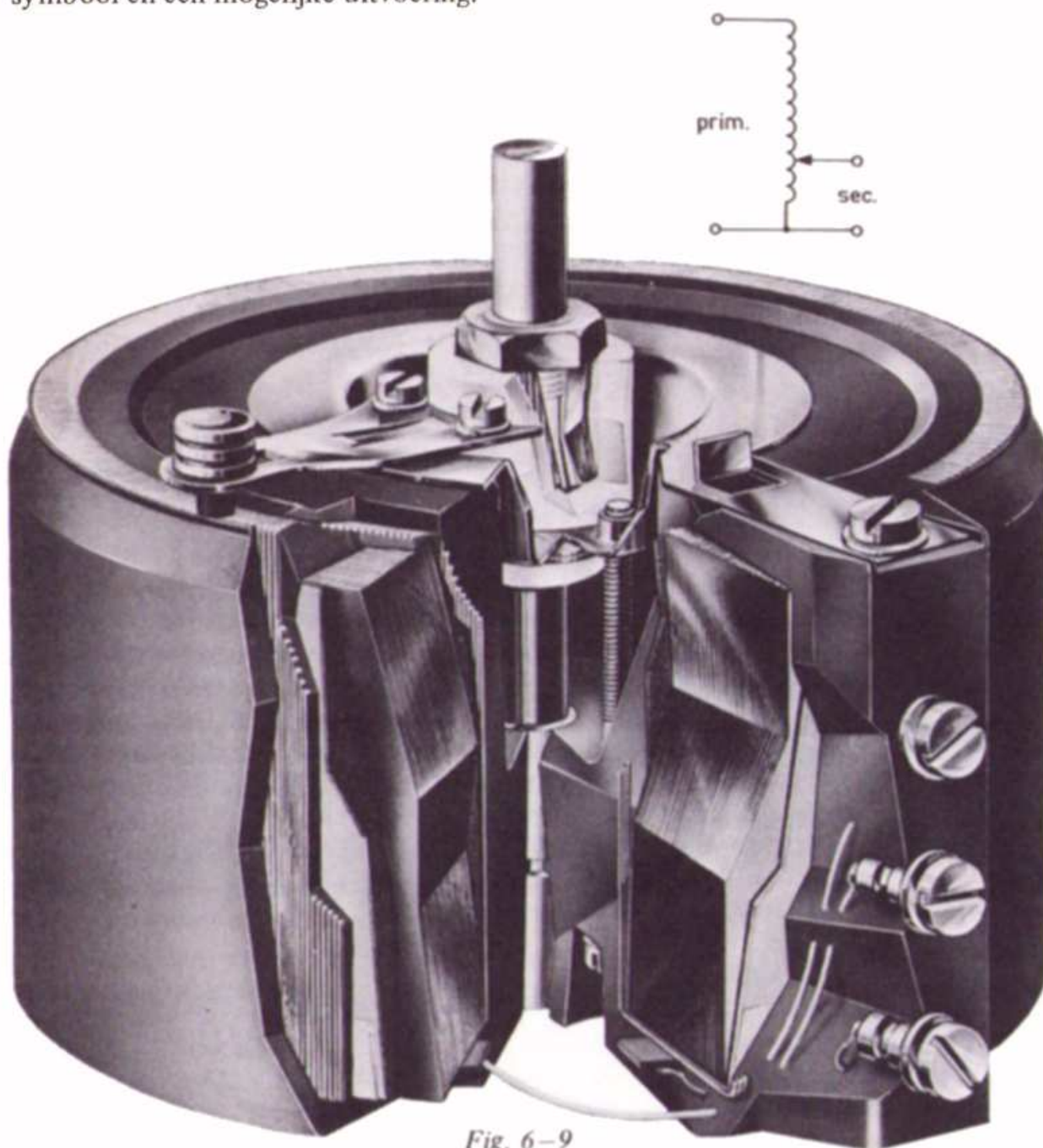
a. Scheidingstransformatoren

Bij deze transformatoren wordt de nadruk gelegd op de galvanische scheiding tussen de primaire en de secundaire wikkeling. De primaire spanning is daarbij meestal gelijk aan de secundaire spanning. Dergelijke transformatoren worden veelvuldig in laboratoria en service werkplaatsen gebruikt om bepaalde delen van de te controleren schakeling naar keuze te kunnen aarden.

Scheidingstransformatoren worden ook gebruikt om een aangesloten apparaat vrij van aarde op te kunnen stellen. Wanneer dan een onder spanning staand deel wordt aangeraakt, zal er geen stroom vloeien door de desbetreffende persoon naar aarde (vloer, verwarmingsbuizen etc.). Een bekende toepassing is bijv. de scheertransformator in vochtige ruimtes.

b. Regeltransformatoren

Dit zijn transformatoren waarvan de secundaire spanning continu kan worden geregeld. Een dergelijke transformator kan als scheidings- dan wel als auto-transformator zijn uitgevoerd. In het laatste geval bevat de kern slechts één wikkeling die zowel als primaire en secundaire wikkeling fungeert. Fig. 6-9 geeft het schema-symbool en een mogelijke uitvoering.



7. Schakelaars

7.1. Groepsindeling

Een schakelaar heeft tot taak om een elektrische keten te sluiten of te onderbreken. Dit sluiten en onderbreken kan op twee geheel verschillende manieren plaats vinden, nl. elektronisch of mechanisch. In het eerste geval wordt de elektrische keten gesloten of onderbroken doordat de inwendige weerstand van een bepaald onderdeel, dat in de desbetreffende stroomketen is opgenomen, klein, dan wel zeer groot wordt. Dit veranderen van de inwendige weerstand wordt bewerkstelligd door magnetische of elektrische velden, dan wel door licht of warmte. Actieve componenten, zoals transistors en elektronenbuizen kunnen als dergelijke schakelaars fungeren, terwijl ook bepaalde passieve componenten zoals PTC- en LDR weerstanden voor dit doel kunnen worden toegepast.

Mechanische schakelaars berusten in principe op het feit dat twee elektroden elektrisch contact met elkaar maken als ze elkaar op de één of andere manier raken, terwijl genoemd contact is verbroken zodra de elektroden elkaar niet meer raken.

Voordelen van elektronische schakelaars t.o.v. mechanische schakelaars zijn:

- korte schakeltijden (in de orde van nano seconden),
- kleine capaciteiten,
- geen bewegende delen (geen slijtage),
- geen mogelijke beschadiging van de contacten.

Nadelen zijn:

- sterke afwijking t.o.v. de ideale schakelaar,
- gevoeliger voor overbelasting,
- de isolatieweerstand bedraagt slechts 10–100 M Ω ,
- de contactweerstand daarentegen is groter dan die van de doorsnee mechanische schakelaar en varieert veelal tussen 1 Ω en 10 Ω ,
- duurder.

Mechanische schakelaars zijn aan de hand van hun constructie in drie hoofdgroepen onder te brengen:

1. schuifschakelaars,
2. drukschakelaars,
3. vloeistofschakelaars.

Bij de schuifschakelaars schuiven de contacten rechtlijnig langs elkaar. In fig. 7–1 is het principe van een dergelijke schakelaar afgebeeld. In de rechter figuur zijn de beweegbare contacten een stap naar rechts verschoven t.o.v. de linker figuur.

Bij de drukschakelaars worden de contacten al dan niet door een contactveer tegen elkaar gedrukt. Deze schakelaars zijn direct te splitsen in schakelaars met een maakcontact (zie fig. 7-2a) en schakelaars met een breekcontact (zie fig. 7-2b).

Bij de vloeistofschakelaars vormt een vloeistof het geleidende medium tussen de contacten, gewoonlijk is dit kwikzilver. Het openen en sluiten van de schakelaar vindt plaats door het tuimelen van de schakelaar (zie fig. 7-3). Vloeistofschakelaars zijn gewoonlijk verwerkt in relais.



Fig. 7-1. Schuifschakelaar.



Fig. 7-2a



Fig. 7-2b

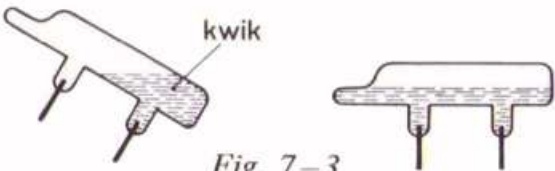


Fig. 7-3

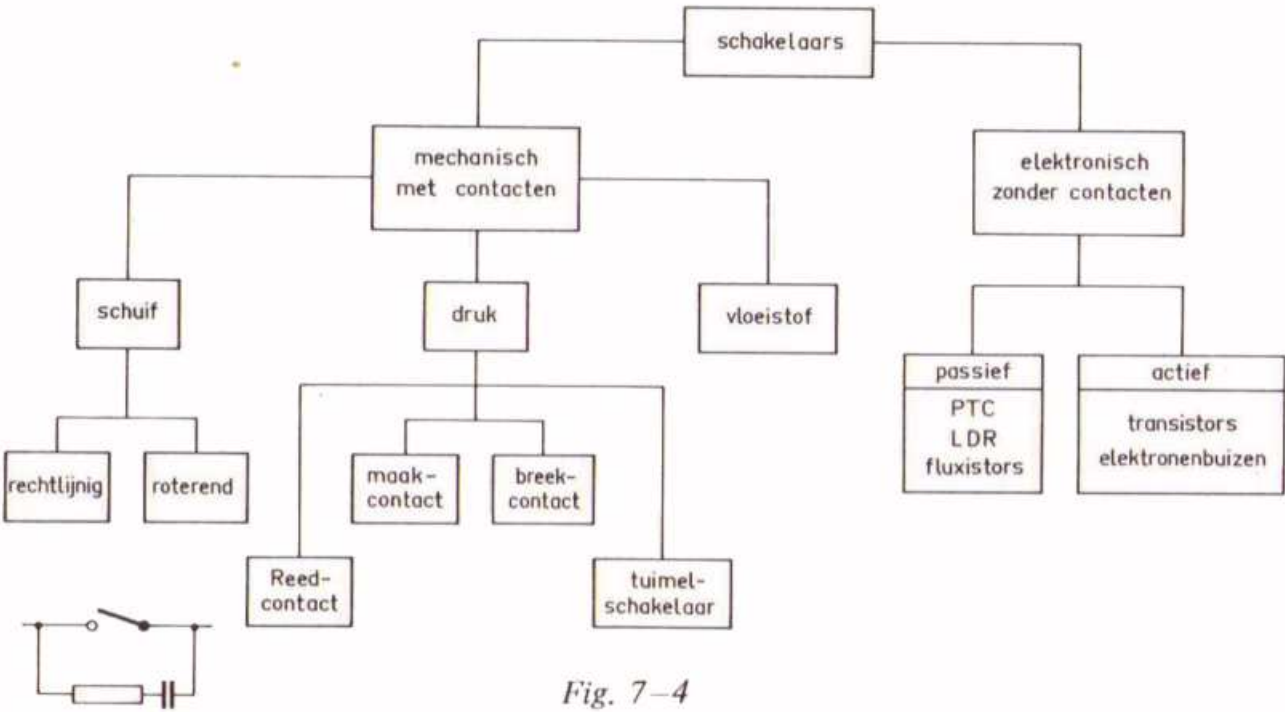


Fig. 7-4

Een speciaal soort schuifschakelaars vormen de roterende schakelaars, terwijl tuimelschakelaars speciale uitvoeringen van drukschakelaars zijn. Bovenstaande indeling van de verschillende soorten schakelaars is in fig. 7—4 in de vorm van een blokschema in beeld gebracht. Mechanische schakelaars worden zowel enkel- als meerpolig in de handel gebracht. Vermeld zij nog dat in dit boek alleen de mechanische schakelaars worden beschreven.

7.2. Enkele elektrische grootheden

Allereerst volgt nu een opsomming van enkele grootheden, die in catalogi van schakelaars vaak worden vermeld.

- De nominale stroomsterkte.
Dit is de grootste stroomsterkte die door de gesloten schakelaar mag vloeien.
- De nominale spanning.
De maximaal toelaatbare spanning tussen de geopende contacten.
- Het schakelvermogen.
Hieronder wordt het maximaal toelaatbare vermogen verstaan dat mag worden onderbroken.
- De contactweerstand.
Dit is de weerstand die over de gesloten contacten wordt gemeten.
- Isolatiweerstand.
Dit is de weerstand gemeten over de geopende schakelaar.

De contactweerstand wordt hoofdzakelijk bepaald door de overgangsweerstand tussen de contacten, die op zijn beurt weer wordt bepaald door:

1. de gesteldheid van het oppervlak van de contacten. Dit heeft zowel betrekking op het materiaal van de contacten als de bedekking daarvan. Verder wordt deze weerstand nog in belangrijke mate bepaald door de eventuele aanwezigheid van stof, oxyde en vet op de contactvlakken. Onder normale omstandigheden bedraagt de contactweerstand enkele milli-ohms. (Dus aanzienlijk lager dan bij de elektronische schakelaars.)

De isolatiweerstand is onder normale omstandigheden afhankelijk van de constructie en het gebruikte isolatiemateriaal. Veelal varieert de grootte van deze weerstand tussen de 10^9 en 10^{12} ohm. (Aanzienlijk hoger dan bij de elektronische schakelaars).

7.3. Beveiliging van schakelaars

Het is bij schakelaars zeer belangrijk dat tussen de contacten geen vuurverschijnselen optreden, wanneer deze worden geopend. Vuurverschijnselen betekenen in eerste instantie dat het contactvlak inbrandt en dus niet meer homogeen is. Verder vormt zich dan gewoonlijk een oxyde laag op de contactvlakken, die aanzienlijk minder geleidend is dan het eigenlijke metaal van de contactplaats. Een doeltreffende oplossing wordt verkregen door de schakelaar te overbruggen door een scha-

keling waarin de stroom langzaam afneemt wanneer de schakelaar wordt geopend. Een typisch voorbeeld van een dergelijke schakeling is afgebeeld in fig. 7-5 en bestaat uit een serieschakeling van een condensator en een weerstand.

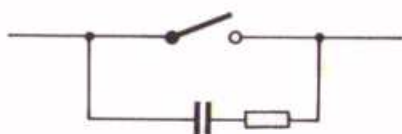


Fig. 7-5

7.4. Reedschakelaars

Een speciaal soort schakelaars vormen de zgn. reedschakelaars, die tegenwoordig steeds meer in elektronische apparatuur worden toegepast.

In zijn eenvoudigste uitvoering bestaat een reedschakelaar uit twee verende contacttongen, die door insmelting in een glazen buisje zijn ondergebracht. Genoemde tongen bestaan uit een zacht soort magnetisch materiaal dat veerkrachtig is, veelal een alliage van ijzer en nikkel. De eigenlijke contacten zijn gewoonlijk van goud. Het glazen buisje is hermetisch gesloten en gevuld met een mengsel van stikstof en waterstof, waardoor vonkvorming en dus mogelijke beschadiging van de contacten tot een minimum wordt gereduceerd. In fig. 7-6 is een dergelijke reedschakelaar afgebeeld.

In de rusttoestand maken de metalen tongen bij deze schakelaar geen onderling contact, zodat de schakelaar dan geopend is. In fig. 7-7 is een permanente magneet afgebeeld. De sterkte van het bijbehorende magnetische veld is in fig. 7-7 voorgesteld door het verloop van de krachtlijnen. In fig. 7-8 is de situatie afgebeeld waarbij de permanente magneet zodanig is opgesteld dat een gedeelte van de krachtlijnen in de lengterichting door de tongen loopt.

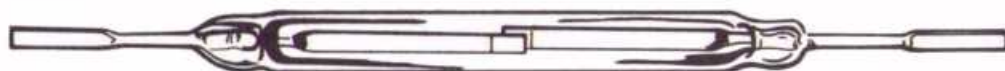


Fig. 7-6

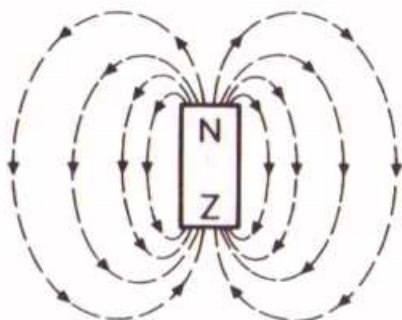


Fig. 7-7

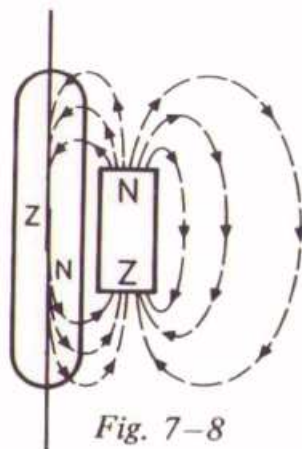


Fig. 7-8

Het directe gevolg hiervan is dat in de uiteinden van de tongen ongelijknamige magneetpolen worden geïnduceerd. De elkaar overlappende einden van de contacttongen trekken elkaar nu aan met als gevolg dat de schakelaar wordt gesloten, mits de veldsterkte voldoende groot is. In fig. 7-9 is de situatie afgebeeld waarbij de permanente magneet in de aangegeven richting wordt verschoven. Uit het getekende krachtlijnenverloop is nu te zien dat in de elkaar overlappende contacten gelijknamige magneetpolen (in dit geval zuidpolen) worden geïnduceerd. Dit betekent dat de uiteinden van de beide contacttongen elkaar afstoten, zodat de schakelaar wordt geopend. Openen en sluiten van de reedschakelaar vindt hier dus plaats door de permanente magneet te verschuiven. Een andere methode om de schakelaar te openen en te sluiten wordt verkregen door tussen de permanente magneet en de schakelaar een ijzeren afscherming te schuiven. In fig. 7-10a is de situatie afgebeeld waarbij de schakelaar is gesloten, terwijl de schakelaar afgebeeld in fig. 7-10b geopend is.

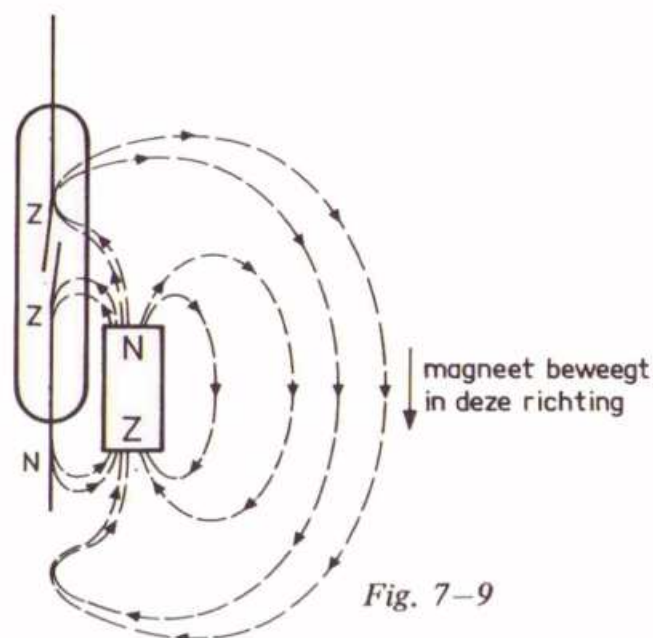


Fig. 7-9

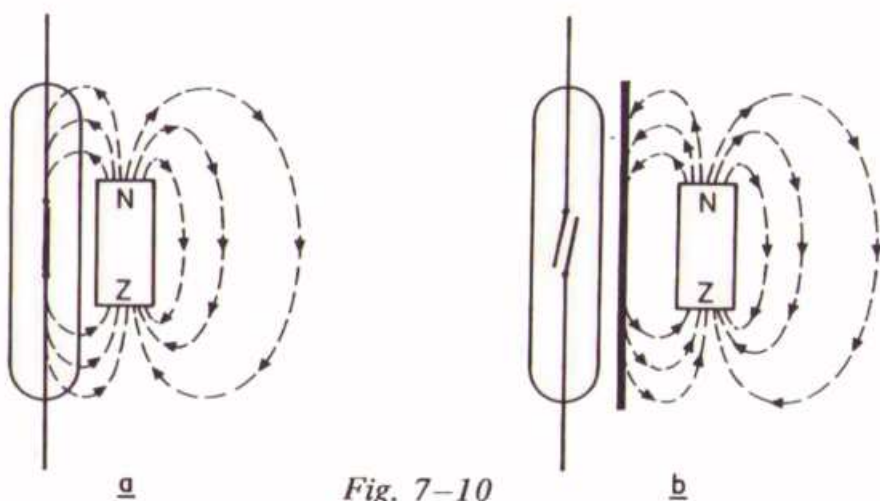


Fig. 7-10

Fig. 7–11 toont een grafiek die voor een bepaalde reedschakelaar de kritische veldsterkten weergeeft. De desbetreffende veldsterkten zijn uitgedrukt in ampère-windingen (AW). Uit de grafiek is af te lezen dat de schakelaar geopend blijft zolang de veldsterkte kleiner is dan 19 AW. Bij overschrijding van deze waarde, wel aangeduid als „maakveld”, wordt de schakelaar gesloten. De schakelaar is echter pas goed en dus betrouwbaar gesloten voor het aangegeven vermogen wanneer de magnetische veldsterkte ter plaatse van de contacten 37 AW bedraagt. Bij vermindering van de veldsterkte wordt de stroomketen weer onderbroken als de veldsterkte kleiner wordt dan 10 AW.

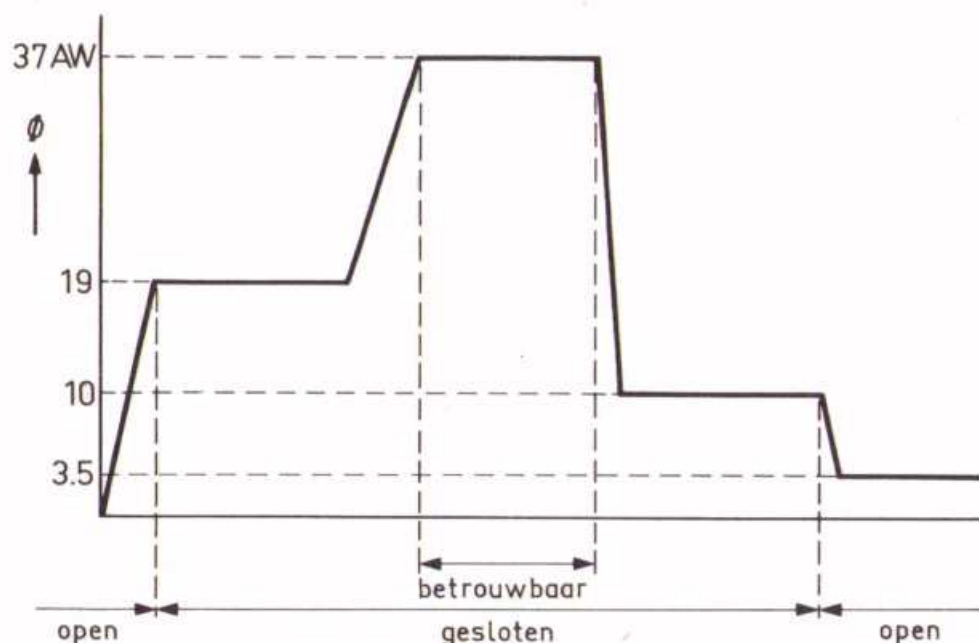


Fig. 7–11

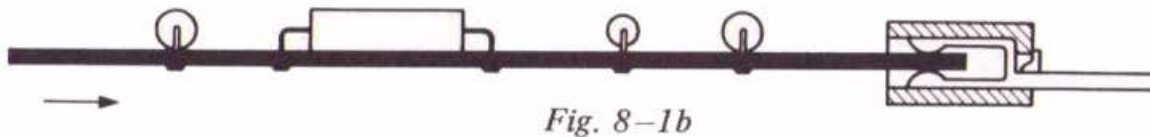
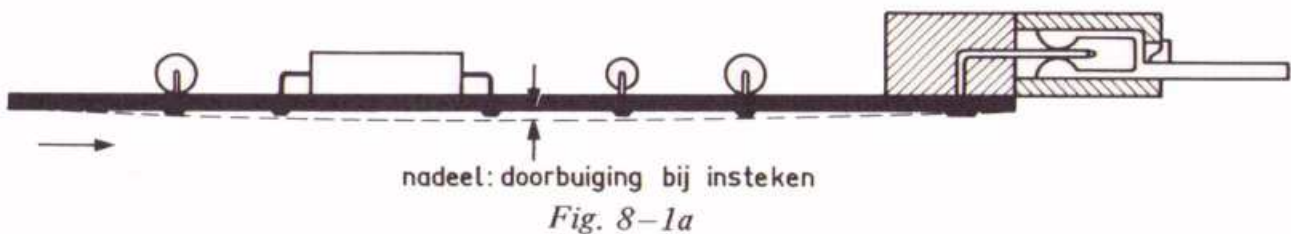
Reedschakelaars worden tegenwoordig op grote schaal toegepast in de elektronica, iets dat mede zijn oorzaak vindt in de grote bedrijfszekerheid. De overgangsweerstand tussen de contacten bedraagt ongeveer $1\ \Omega$.

8. Connectors

8.1. Overzicht en eisen

Een connector heeft tot taak om een elektrische verbinding tot stand te brengen, die op een gemakkelijke manier zonder solderen moet kunnen worden verbroken. Actueel werden deze onderdelen bij de invoering van functionele modules waarbij panelen met een gedrukte bedrading door middel van steekverbindingen snel moeten kunnen worden uitgewisseld.

Er zijn twee uitvoeringen te onderscheiden. Bij de eerste (directe connectors) is het paneel met gedrukte bedrading voorzien van contacten die tegelijk met de bedrading in printvorm op het paneel worden aangebracht, terwijl bij de andere uitvoering (indirecte connectors) het paneel is voorzien van speciale contactstukken die op de printplaat worden bevestigd. In fig. 8-1a en 8-1b is een afbeelding van beide uitvoeringen gegeven.



Connectors worden tegenwoordig door een groot aantal firma's in grote verscheidenheid op de markt gebracht, zodat hier wordt volstaan met enkele belangrijke opmerkingen. In de eerste plaats de manier van aansluiten. Er zijn uitvoeringen geschikt voor het maken van soldeerverbindingen, doch ook die bedoeld zijn voor klemverbindingen (wire wrapping). In het laatste geval is de connector voorzien van stevige messing contactpennen. Als isolatiemateriaal wordt veelal polycarbonaat met eventuele versterking van glasvezels verwerkt. De contacten zijn meestal van fosforbrons of berylliumbrons, aangezien beide legeringen zeer veerkrachtig zijn en blijven. Om een goed contact te verkrijgen zijn de contactplaatsen vernikkeld en vervolgens verguld. Op deze plaatsen treedt de grootste stroomdichtheid

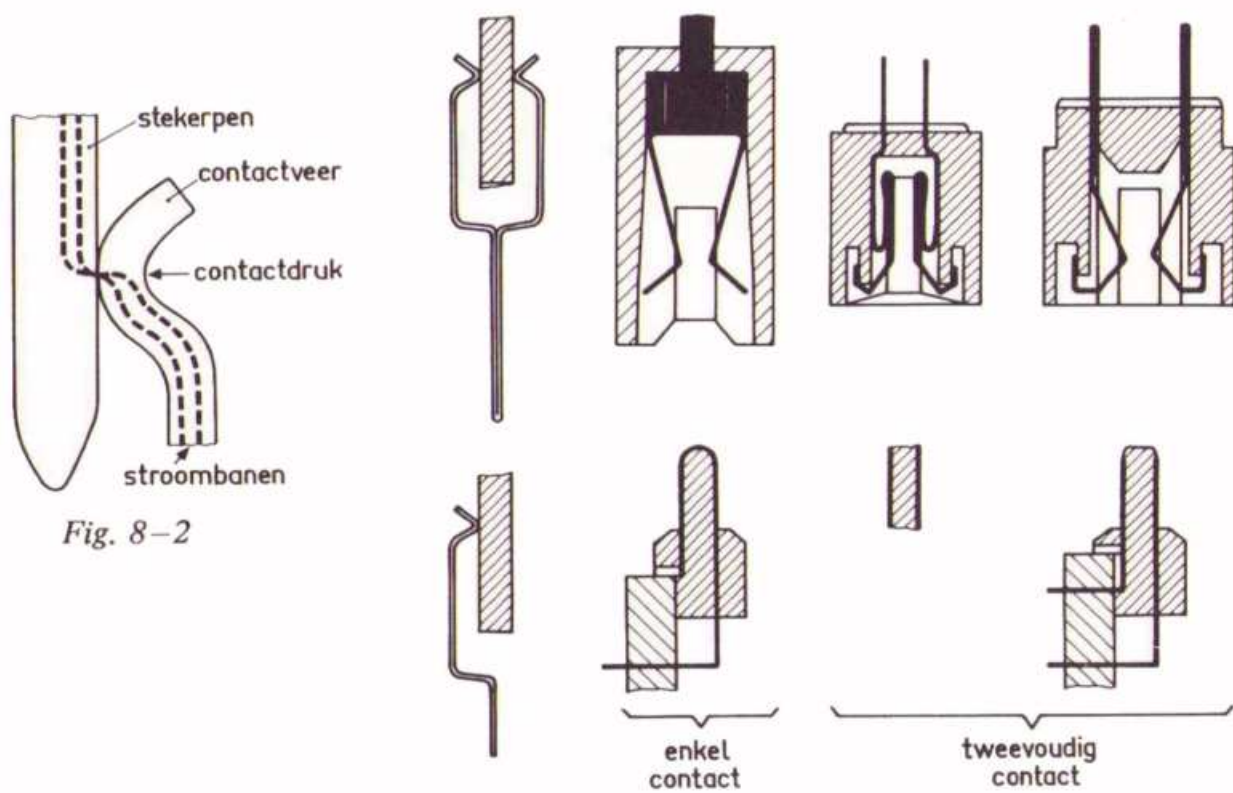


Fig. 8-3

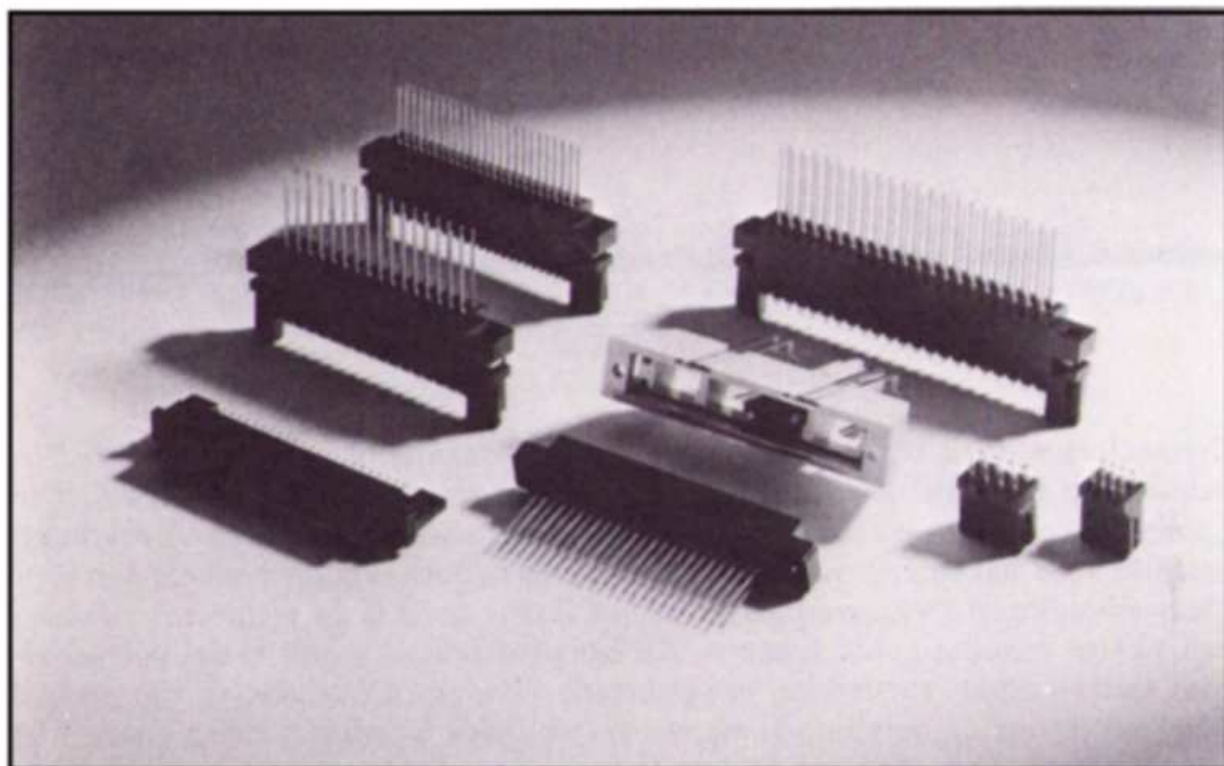


Fig. 8-4

op, zoals is aangegeven in fig. 8—2. Het verende contact moet steeds krachtig tegen het mescontact drukken om te voorkomen dat het eigenlijk contact wordt bedekt met een uiterst dun laagje oxyde waarvan het directe gevolg is dat het contact aldaar slechter wordt.

Bij de directe connectors wordt steeds de dikte van de bijbehorende printplaat vermeld (1,6 of 2,4 mm). Connectors worden enkel- en dubbelzijdig uitgevoerd, waarbij het aantal aansluitingen tot 96 kan worden opgevoerd. In fig. 8—3 is een overzicht gegeven van een aantal contacten zoals die worden toegepast in connectors. Fig. 8—4 toont een moderne uitvoering van een connector.

9. Gedrukte bedrading

9.1. Gedrukte bedradingspanelen

De eigenlijke bedrading bestaat bij deze verbindingstechniek uit stroken koperfolie, gewoonlijk sporen genoemd, die op isolatiemateriaal zijn aangebracht. Op deze wijze wordt een overzichtelijke bedrading verkregen, die in één vlak ligt. Dit laatste betekent dat veel aan ruimte wordt gewonnen, terwijl het aanbrengen van de onderdelen en het solderen vaak geautomatiseerd kunnen worden. Kruisingen in de bedrading zijn niet mogelijk, met als gevolg dat het verloop van de sporen vaak zeer grillig is. Soms moeten toch nog overbruggingen worden aangebracht. Dit zijn dan draadverbindingen tussen bepaalde sporen zonder elektrisch contact met de tussenliggende sporen.

Eerdergenoemd isolatiemateriaal kan flexibel (buigzaam) en niet-flexibel (star) zijn. Als buigzaam isolatiemateriaal worden vooral polyester en polyimid voor dit doel gebruikt, terwijl hardpapier en epoxyglas in aanmerking komen voor starre bedradingspanelen. In fig. 9-1 is een buigzaam exemplaar afgebeeld.



Fig. 9-1

Momenteel worden panelen met enkel- en dubbelzijdige bedrading in de meest uiteenlopende elektronische apparatuur verwerkt. Meervoudige panelen hebben op dit ogenblik nog geen grote ingang gevonden. In fig. 9-2a, b en c is de doorsnede van resp. een enkelzijdig, een dubbelzijdig en een meervoudig bedradingspaneel afgebeeld.

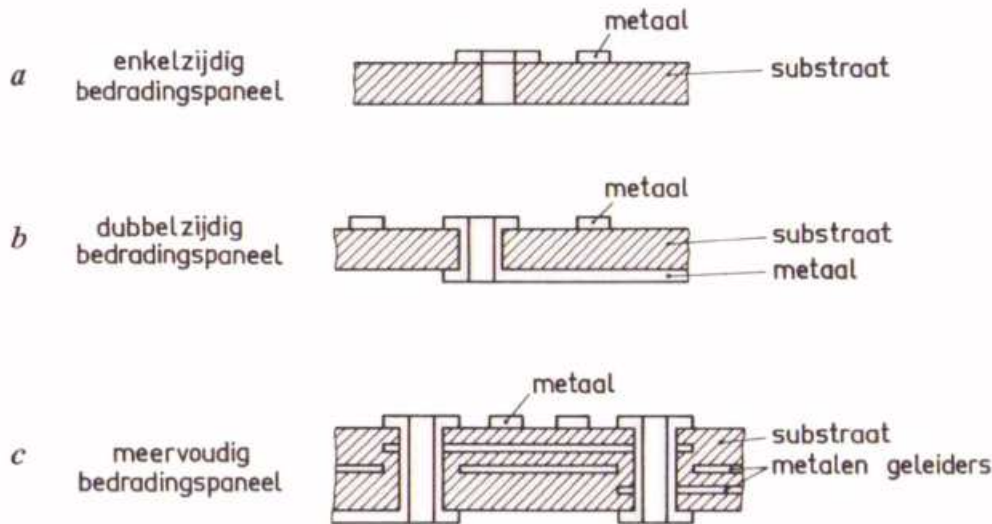


Fig. 9-2

9.2. Hoe komt een dergelijke bedrading tot stand?

Bij het ontwerp dient allereerst rekening te worden gehouden met het feit dat meestal ook onderdelen met meerdere aansluitcontacten in de bedrading moeten worden opgenomen. Enkele voorbeelden hiervan zijn schuifschakelaars, IC's, potentiometers en bepaalde soorten transistors.

De onderlinge afstand tussen twee opeenvolgende contacten wordt door de fabrikant gewoonlijk aangegeven in een zgn. „*e*-maat”. De lengte-eenheid „*e*” is gelijk aan 0,1 inch = 2,54 mm. Een afstand van 2 *e* heeft zodoende betrekking op 5,08 mm. Van de desbetreffende schakeling wordt nu een bedradingstekening gemaakt op speciaal voor dit doel ontwikkeld ruitjespapier. De lijnafstand zowel in horizontale als verticale richting is *e* dan wel een veelvoud van *e*, terwijl het papier zelf krimpvrij moet zijn. De te maken tekening wordt op een schaal 2:1 of nog groter uitgewerkt en vervolgens langs fotografische weg tot de gewenste proporties verkleind. Het aldus verkregen negatief dient nu als uitgangsmateriaal voor het te volgen fabricageprocédé.

Er zijn nu twee geheel verschillende fabricageprocessen in gebruik. In het eerste geval wordt uitgegaan van een plaat isolatiemateriaal, die aan één of twee zijden is bedekt met een laag koperfolie. Ter oriëntatie zij nog vermeld dat het niet-buigzame isolatiemateriaal veelal 0,8; 1,5 dan wel 1,6 mm dik is. Enkele veel voorkomende waarden van de dikte van de opgebrachte koperlaag zijn achtereenvolgens 20, 35, 70 en 105 μm .

Het koperoppervlak wordt nu eerst bedekt met een fotogevoelige laag, die via het negatief wordt belicht, zodat de belichte lijnen een getrouwe copie zijn van de lijnen op de originele tekening. Na ontwikkelen wordt het niet-verlichte fotogevoelige materiaal verwijderd van het koper, waarna dit koper wordt weggeëtsd. Het koper dat na dit proces op het isolatiemateriaal achterblijft, vormt nu een getrouw beeld van het sporenpatroon op de tekening.

Dit fabricageproces wordt in de techniek veelal aangeduid als de subtractieve methode, omdat hier materiaal wordt weggenomen om het sporenpatroon te verkrijgen. In fig. 9-3 zijn de verschillende fasen van genoemd proces in beeld gebracht.

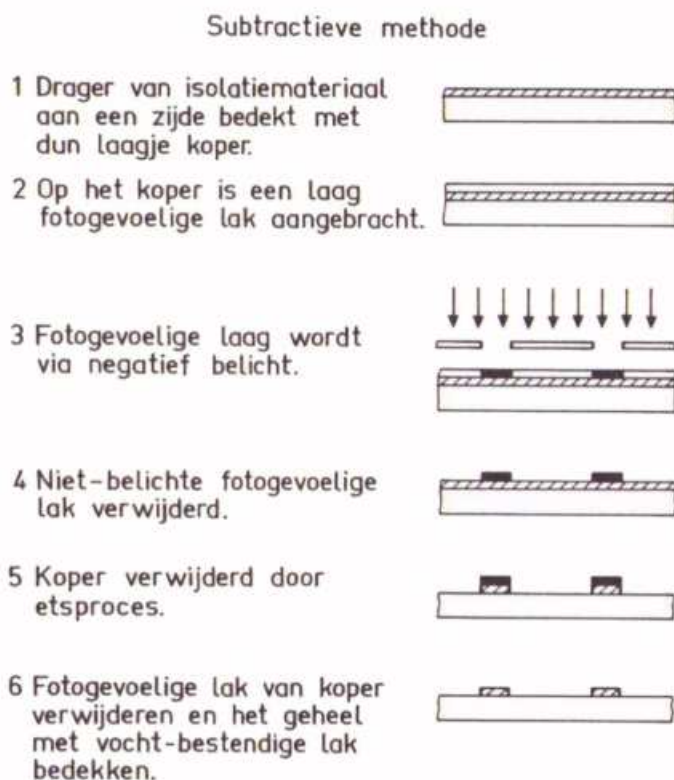


Fig. 9-3

Een geheel andere fabricagemethode is het zgn. additieve proces. Hier wordt uitgegaan van een plaat blank isolatiemateriaal, die wordt bedekt met een hechtlaag, die titaandioxyde bevat dat fotogevoelig is. Op deze laag wordt een dunne laag palladiumchloride aangebracht, waarna het geheel wordt belicht met ultraviolet licht. Als gevolg van een foto-chemisch proces ontstaat door de belichting zuiver palladium. Het niet-belichte materiaal wordt vervolgens weggeëtsd, zodat het palladium een getrouw beeld geeft van de tekening waarvan is uitgegaan. Op dit palladium wordt vervolgens een koperlaag aangebracht door elektrolyse. Deze methode wordt gewoonlijk toegepast bij de fabricage van buigzame bedradingspanelen. In fig. 9-4 zijn de verschillende fasen van dit proces in beeld gebracht.

Additieve methode

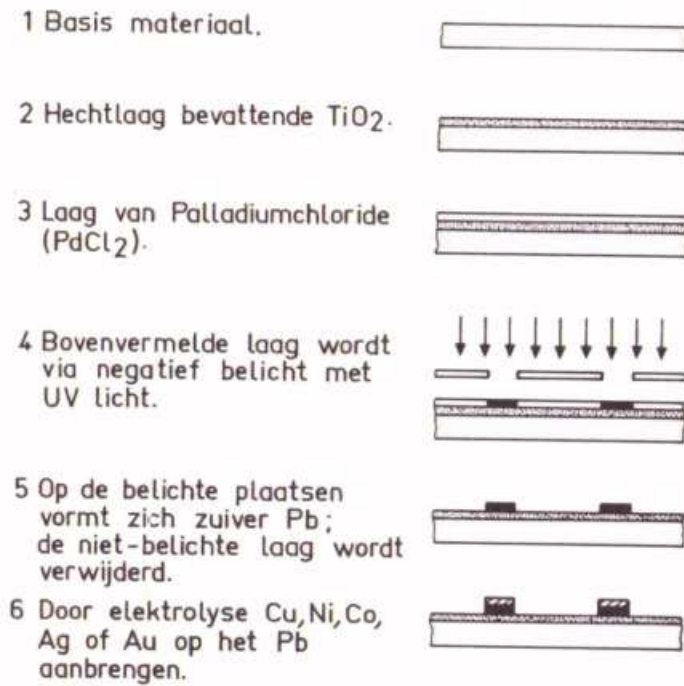


Fig. 9-4

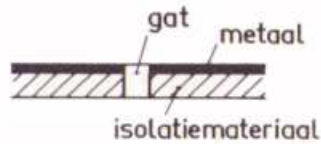


Fig. 9-5

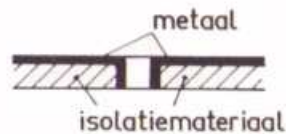


Fig. 9-6

De gaten die nodig zijn voor het opzetten van de onderdelen kunnen zijn uitgevoerd als afgebeeld in fig. 9-5 of als afgebeeld in fig. 9-6. Bij de laatste uitvoering is de verbinding veel meer solide en dus te prefereren wanneer bepaalde eisen op het gebied van de betrouwbaarheid worden gesteld.

Tegenwoordig wordt een dergelijke bedrading veelal ontworpen met behulp van een speciaal computerprogramma. Een punt dat extra aandacht verdient is het solderen, dus de verbinding tussen de aan te brengen onderdelen en de printsporen. Sterke verwarming is nl. schadelijk voor de hechting van het metaal op het isolatiemateriaal.

Neem dan ook steeds de volgende punten in acht:

1. Soldeer snel; niet langer dan 10 seconden achtereen.
2. Laat de soldeerbout niet te heet worden; een stifttemperatuur van 230–250 °C voldoet goed.
3. Zorg er steeds voor dat de soldeerstift goed schoon en vertind is.

4. De stift van de soldeerbout moet taps toelopen opdat slechts de plaats waar de soldeerverbinding moet worden gemaakt, wordt verwarmd. Ze mag echter niet te spits zijn, aangezien in dat geval een te gering warmtecontact tussen stift en soldeerplaats optreedt.
5. Gebruik steeds harskernsoldeer met een laag smeltpunt (60% tin, 40% lood).
6. Gebruik nooit soldeervet aangezien de zuren die het vet bevat, de bedrading en/of de hardpapierplaat aantasten. Indien nodig wat extra soldeershars gebruiken.
7. Gebruik bij het lossolderen zoveel mogelijk een zuigsoldeerbout waarbij eventueel wat soldeershars wordt aangebracht op de te verhitten plaats; dit laatste bevordert een snel vloeien van het aanwezige soldeer.

10. Veiligheden

10.1. Inleiding

Elektronische apparatuur en bijbehorende leidingen moeten in het algemeen worden beschermd tegen een te hoge temperatuur dan wel een te hoge spanning. De te hoge temperatuur is in veel gevallen het gevolg van het feit dat de stroomsterkte in de desbetreffende leiding groter is dan waarvoor deze is berekend. Genoemde toename van de stroomsterkte kan worden veroorzaakt door overbelasting dan wel doordat plotseling een storing (kortsluiting) in de stroomketen optreedt. Met nadruk dient er op te worden gewezen dat niet alleen een grote overbelasting gevaarlijk is, doch ook een geringere overbelasting die langdurig aanhoudt. Een zeer grote overbelasting treedt op in het geval van kortsluiting. In het algemeen gesproken moet de beveiliging dan onmiddellijk in werking treden en de gevormde kortsluitketen onderbreken. Een geringe overbelasting kan zeer gevaarlijk zijn als de toename van de stroom net niet voldoende is om de beveiliging in werking te stellen. De temperatuur loopt in dat geval geleidelijk op, waardoor op de lange duur verkoling van de isolatie optreedt. Dit laatste houdt in dat de kans op brand en ongelukken dan zeer groot wordt.

10.2. Stroombeveiliging

Als belangrijkste eis geldt, dat het onderbreken van de stroomketen op een ongevaarlijke manier moet plaatsvinden. Naarmate het af te schakelen vermogen groter wordt, neemt de kans op gevaar toe (gevaar in de vorm van vuurverschijnselen). Vooral bij kortsluiting is dit het geval, aangezien de uitwendige weerstand van de stroomketen dan tot nul is gedaald en de stroomsterkte alleen nog wordt bepaald door de inwendige weerstand van de spanningsbron en de bijbehorende leidingen. In fig. 10-1a is een stroomketen bestaande uit een spanningsbron met inwendige weerstand van $R_i \Omega$ en een belastingsweerstand van $R_u \Omega$ afgebeeld en daarnaast

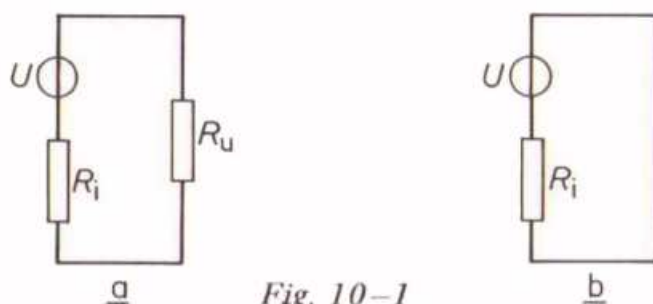


Fig. 10-1

eenzelfde keten doch nu met kortgesloten belasting. In het eerste geval bedraagt de stroomsterkte in de keten

$$I = \frac{U}{R_i + R_u}$$

terwijl deze in de kortsluitketen (fig. 10–1b) is opgelopen tot

$$I = \frac{U}{R_i}$$

$$[I \dots (\text{A}); U \dots (\text{V}); R_i \text{ en } R_u \dots (\Omega)]$$

Het onderbreken van de kortsluitketen kan thermisch, magnetisch, dan wel door een combinatie van beide plaatsvinden.

Opgemerkt zij nog dat in de huidige elektronica veel schakelingen met actieve componenten zijn ontwikkeld om de desbetreffende stroomketens te beveiligen.

Bij thermische beveiliging wordt de stroomketen onderbroken doordat een metalen draadje smelt, dan wel door vervorming van een strookje bi-metaal. Magnetische onderbreking berust op het principe van een relais, dat in werking treedt wanneer de stroomsterkte een bepaalde waarde overschrijdt. Uit het bovenstaande volgt direct dat een veiligheid werkend volgens het principe waarbij een stroomvoerende draad doorsmelt, slechts eenmalig is te gebruiken, dit in tegenstelling tot de andere veiligheden.

De verschillende soorten veiligheden kunnen al naar gelang het principe worden verdeeld in stroomveiligheden (10.3 t/m 10.5) en spanningsveiligheden (10.6).

10.3. Smeltveiligheden

De meest verbreide manier van stroombeveiliging is de zgn. smeltdraadbeveiliging, waarbij een metalen draadje als gevolg van de daarin ontwikkelde warmte doorsmelt. Het materiaal dat hiervoor wordt gebruikt, dient in eerste instantie een goede stroomgeleider te zijn en mag in geen geval oxyderen.

Gewoonlijk wordt zilver voor dit doel gebruikt (smeltpunt ca. 960 °C).

Een veiligheid kan worden beschouwd als een zwakke schakel, die opzettelijk in een elektrische stroomketen wordt aangebracht, om de keten aldaar op een ongevaarlijke manier te kunnen onderbreken. De ontstane onderbreking wordt in het algemeen weer opgeheven door de desbetreffende veiligheid te vervangen door een nieuwe.

Smeltveiligheden komen voor als:

1. open buisveiligheden, (deze worden in veel landen thans verboden),
2. gesloten buisveiligheden.

Open buisveiligheden (zie fig. 10–2) bestaan uit een holle cilinder van isolatiemateriaal die aan beide zijden open is. Ter bevordering van de koeling dient de veilig-

heid verticaal te worden gemonteerd. In elektronische apparatuur, bijv. op het gebied van de telecommunicatie, werden deze veiligheden toegepast in ketens van klein vermogen. In het algemeen bevatten ze een zilveren draad die tussen twee verende contacten is gespannen. Smelt de draad dan springen de contacten terug en worden eventueel optredende vuurverschijnselen tot een minimum beperkt. De veiligheid kan opnieuw worden gebruikt door een nieuwe smeltdraad tussen de contacten aan te brengen. Zeer vaak worden de contacten nog verbonden met een signaleringssysteem waardoor direct kan worden vastgesteld of de veiligheid is doorgebrand.

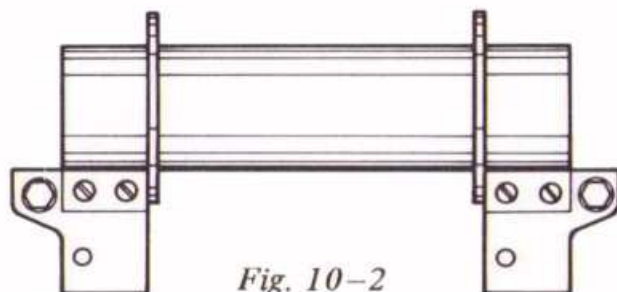


Fig. 10-2

Bij gesloten buisveiligheden is de smeltdraad in een holle cilinder van isolatiemateriaal (meestal keramiek of glas) aangebracht, die aan beide zijden is afgesloten door metalen delen. Door de compacte bouw van het geheel worden deze veiligheden meestal aangeduid als smeltpatronen.

Aan de hand van de constructie zijn de gesloten veiligheden te verdelen in:

- schroefpatronen,
- diazed patronen,
- mespatronen,
- glasbuispatronen.

Aan gesloten veiligheden wordt de eis gesteld dat er bij het doorsmelten van de zilverdraad geen vlamboog binnen de patroon blijft staan, terwijl er evenmin metaaldamp of vloeibaar metaal uit de veiligheid mag ontsnappen. Dit is dan ook de reden dat de patronen meestal gevuld zijn met fijn zand, asbestpoeder of een mengsel van beide. Voor de gebruikelijke smeltpatronen geldt verder het voorschrift, dat een bepaalde patroon zonder speciale voorzieningen niet kan worden vervangen door een patroon die berekend is voor een grotere nominale stroomsterkte. Zo is het bijv. niet mogelijk om een patroon met een nominale stroomsterkte van 25 A in een smeltpatroonhouder geschikt voor 6 A te plaatsen. Bij schroefpatronen waarbij schroefkop en patroon een geheel vormen, wordt dit verkregen door de patronen voor hogere stroomsterkten minder lang te maken. Dit systeem staat bekend als het L-systeem (L = lengte). In fig. 10-3 is de doorsnede van een L-patroon met bijbehorende passchroef afgebeeld. De passchroef wordt bij dit systeem eenmalig in de patroonhouder aangebracht. Wordt de smeltpatroon nu in de patroonhouder geschroefd, dan wordt het contactvlak van de patroon

tegen dat van de passchroef gedrukt, zodat de stroomdoorgang plaatsvindt van passchroef via smeltdraad naar de edisonschroefdraad op de patroon.

Verder is de patroon nog voorzien van een verklikkersysteem, waardoor het mogelijk wordt om direct visueel te kunnen vaststellen of de zilverdraad is doorgesmolten. Hiertoe is parallel aan de smeltdraad nog een dunne draad van weerstandsmateriaal aangebracht, die wordt aangeduid als de melddraad. Aan het ene uiteinde van deze draad bevindt zich een gekleurd verklikkerplaatje, de melder. Zodra de draad doorsmelt wordt deze melder door een veertje weggedrukt (zie ook fig. 10-3).

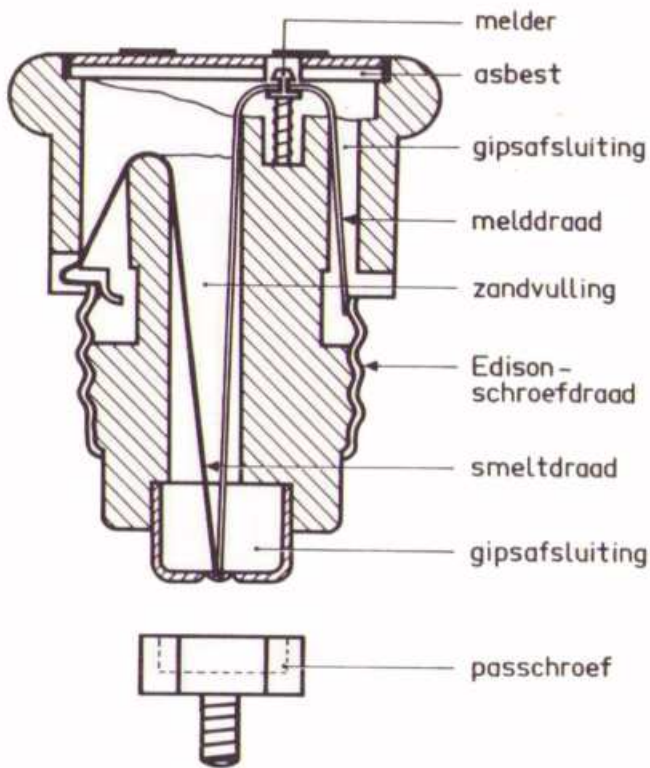


Fig. 10-3

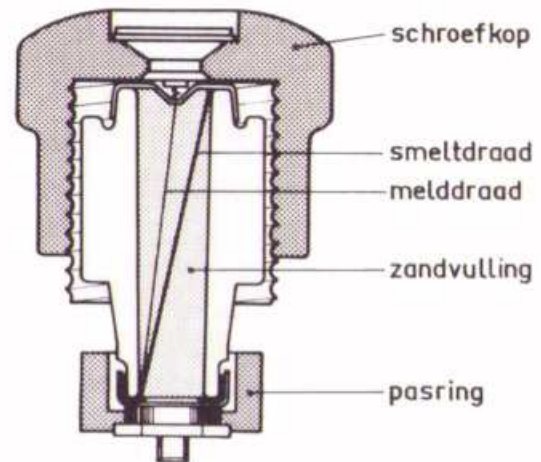
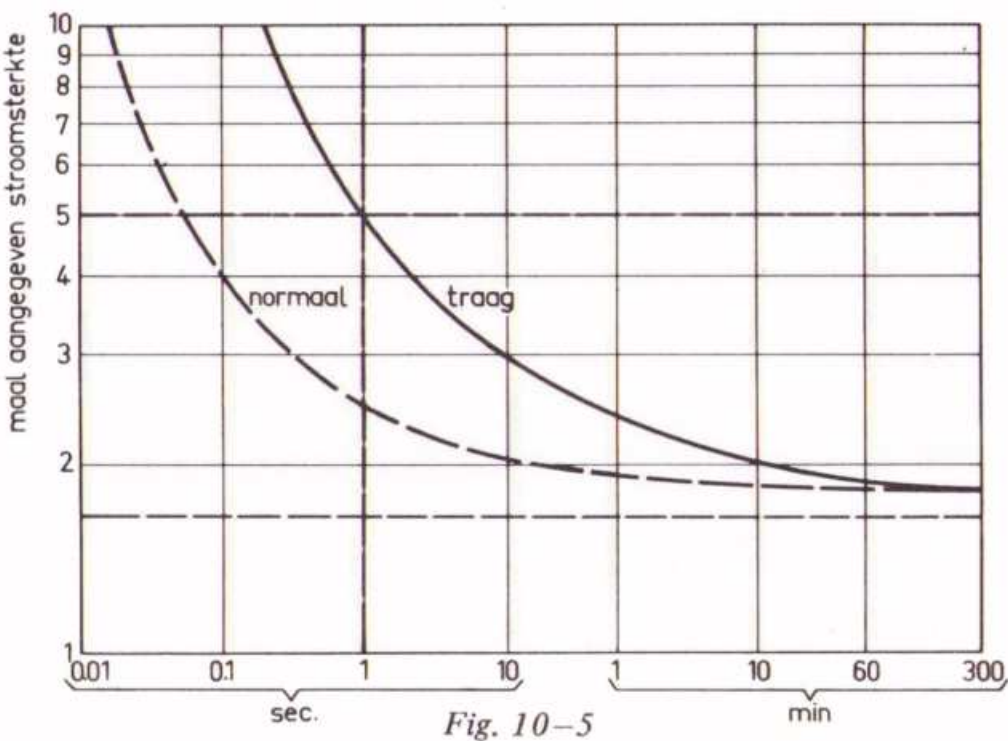


Fig. 10-4

In tegenstelling tot het L-systeem worden steeds meer schroefpatronen volgens het D-systeem gebruikt. Dit temeer omdat ze goedkoper zijn. Een dergelijke veiligheid bestaat uit een patroonhouder waarin een passchroef wordt aangebracht en verder een D-(diazed) patroon, die door een losse schroefkop in genoemde patroonhouder wordt opgesloten. In fig. 10-4 is een dergelijke veiligheid bestaande uit schroefkop, diazed patroon en passchroef afgebeeld. Ter informatie zij nog vermeld dat het woord „diazed” een samenstelling is van de eerste letters van de woorden — diameter, zweiteilig, Edison —.

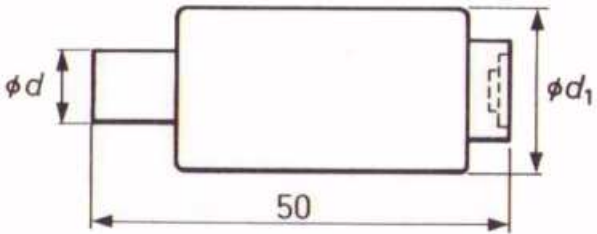
De lengte van de patronen is gestandaardiseerd en bedraagt 50 mm voor stroomsterkten variërend van 2 t/m 65 A. Naarmate de nominale stroomsterkte van de patronen toeneemt, wordt de diameter van het contact van de patroon en de opening van de bijbehorende passchroef groter. Hiermede wordt voldaan aan de voorgeschreven eis van de niet-verwisselbaarheid. Patroon en passchroef behoren dus steeds bij elkaar.

Teneinde het aanrakingsgevaar te reduceren, moet de netzijde van de installatie op de passchroef worden aangesloten en de belasting (apparaten en lichtpunten) op het contact met de schroefkop. In deze schroefkop is aan de voorzijde een opening aangebracht waardoor het mogelijk is om de melder te observeren zonder dat de patroon uit de houder moet worden geschroefd. In de volgende tabel zijn voor de meest gangbare waarden van de nominale stroomsterkte de kleur van de verklikker, de diameter van het contact (d), de diameter van de smeltpatroon (d_1) en de soort schroefdraad in de bijbehorende schroefkop aangegeven.



Tabel 1

I_{nom}	kleur	d (mm)	d_1 (mm)	schroefdraad
0,5	WIT	6	13,2	E16
1	ROOD	6		
2	ROSE	6		
4	BRUIN	6		
6	GROEN	6		
10	ROOD	8		
15	GRIJS	10		
20	BLAUW	12	22,5	E33
25	GEEL	14		
35	ZWART	16		
50	WIT	18		
60	KOPER	20		



De maximaal toelaatbare spanning van al deze veiligheden bedraagt 500 V. Diazed patronen zijn leverbaar als snelle en als trage veiligheden. In fig. 10-5 zijn enkele doorsmeltkarakteristieken van beide soorten afgebeeld.

Mespatronen zijn gesloten smeltveiligheden met mescontacten. In fig. 10-6 is een dergelijke veiligheid afgebeeld. Ze zijn zowel in snelle als in trage uitvoering in de handel verkrijgbaar en worden hoofdzakelijk voor industriële doeleinden gebruikt. Mespatronen met een nominale stroomsterkte variërend tussen de 6 en 630 A zijn in de handel verkrijgbaar. Zeer vaak zijn deze patronen uitgerust met een uitwisselbaar handvat. De maximaal toelaatbare spanning bedraagt 500 V.

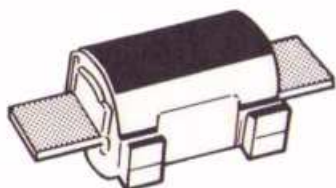


Fig. 10-6

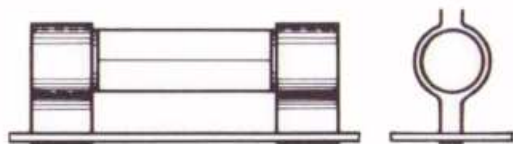


Fig. 10-7

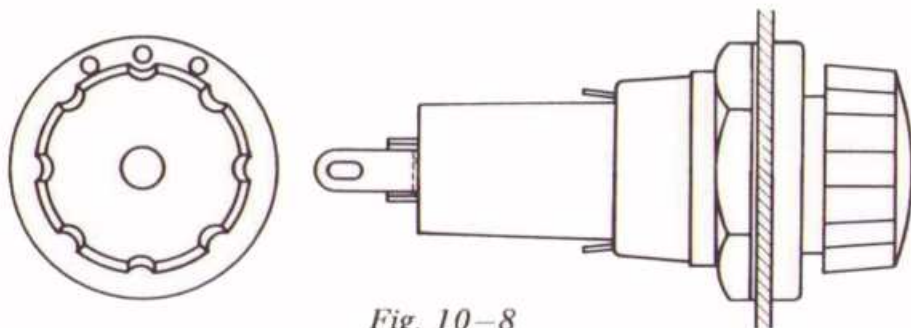


Fig. 10-8

Glasbuisveiligheden zijn in het algemeen miniatuur-buispatronen. Ze bestaan uit een glazen buisje dat aan beide einden is afgesloten door een metalen kapje. Beide kapjes, die de contacten van de veiligheid vormen, zijn onderling verbonden door een zilveren draad. De lengte van deze veiligheden is gestandaardiseerd op 20 mm en de diameter op 5 mm*. Voor kleine stroomsterkten (30-60 mA) zijn ze doorzichtig, terwijl de uitvoeringen voor grotere stroomsterkten gewoonlijk zijn gevuld met fijn zand. In fig. 10-7 is een open veiligheidshouder met buisveiligheid afgebeeld. De veiligheid wordt bij deze constructie tussen de contactveren geklemd. Er zijn daarbij ook uitvoeringen die speciaal zijn ontworpen voor montage op panelen met een gedrukte bedrading.

Voor paneelmontage zijn speciale veiligheidshouders in de handel. In fig. 10-8 is een uitvoering afgebeeld, waarbij de veiligheid geheel is ingesloten. In de schroefkop is een opening aangebracht opdat de spanning over de veiligheid met een spanningszoeker kan worden gecontroleerd zonder dat de schroefkop behoeft te wor-

* Er zijn ook veel glasbuisveiligheden met afmetingen 6,3 x 32 mm in de handel.

den verwijderd. Als nominale spanning wordt voor dit soort veiligheden gewoonlijk 250 V opgegeven.

Zoals reeds eerder vermeld, kunnen de stroomveiligheden worden verdeeld in snelle en trage veiligheden. Het verschil tussen beide soorten wordt gekenmerkt door de doorsmeltkarakteristiek. In fig. 10-5 is een grafiek afgebeeld waarin langs de horizontale as de doorsmelttijd is uitgezet en langs de verticale as een constante waarmede de nominale waarde van de desbetreffende veiligheid moet worden vermenigvuldigd om de doorsmeltstroomsterkte te verkrijgen. De getrokken lijn geeft het gedrag van een trage veiligheid aan, terwijl de streepjeslijn voor een snelle veiligheid geldt. Uit deze grafiek volgt dat een snelle veiligheid met een nominale waarde van 10 A in 0,1 sec. doorsmelt als de sterkte van de kortsluitstroom 40 A bedraagt. Wanneer het een trage veiligheid betreft, zal dit doorsmelten in 2 seconden plaatsvinden bij dezelfde kortsluitstroom.

In fig. 10-9 is een speciaal soort stroomveiligheid afgebeeld. Het geheel bestaat uit een plaatje van hardpapier met aan beide zijden een veertje (A en B in fig. 10-10). Beide veertjes zijn in punt C door een soldeerverbinding met elkaar verbonden. Stijgt de temperatuur van de soldeerverbinding tot ongeveer 125°C , dan smelt het soldeer en springen de uiteinden van de veertjes uit elkaar, waardoor de stroomdoorgang wordt verbroken. Dit soort veiligheden wordt veel toegepast bij kleine transformatoren. Ze worden daarbij tussen de wikkelingen aangebracht en fungeren zodoende als temperatuurbeveiliging.

Springweerstanden werken volgens hetzelfde principe, zie fig. 10-10. Deze combinaties van veiligheid en weerstand worden in bepaalde TV-ontvangers toegepast.

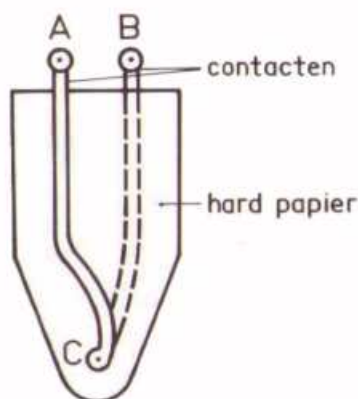


Fig. 10-9

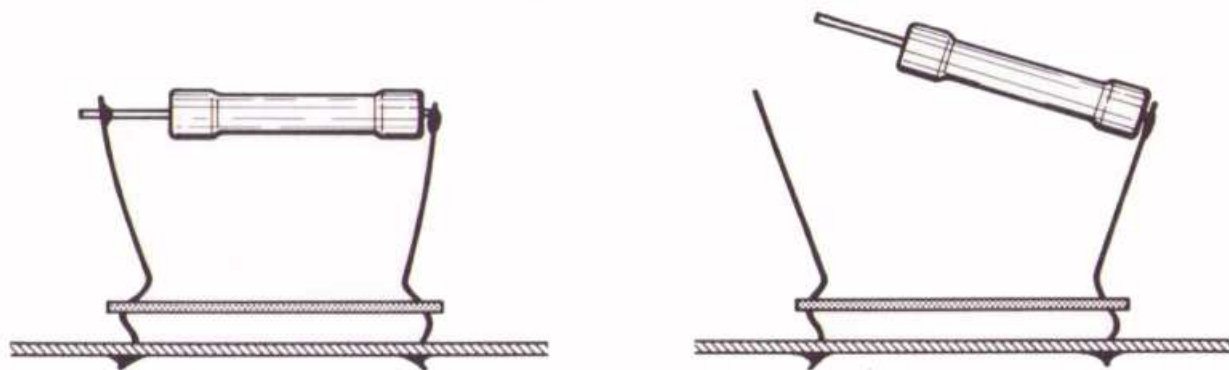


Fig. 10-10

Belasting en beveiliging van leidingen met aderisolatie van rubber of vinyl, geen kabels zijnde.

Nominale koper-doorsnede mm ²	Vaste leidingen		Verplaatsbare leidingen	
	hoogste belasting	grootste nominale stroom van de smelt-patroon A	hoogste belasting A	grootste nominale stroom van de smelt-patroon A
0,75	—	—	10	16
1	—	—	12	16
1,5	14	10	16	16
2,5	20	16	25	20
4	25	20	31	25
6	31	25	43	35
10	43	35	66	63
16	75	63	90	80
25	100	80	110	100
35	125	100	140	125
50	160	125	175	160
70	200	160	215	200
95	240	200	260	224
120	280	224	305	250
150	325	250	350	280
185	380	315	400	315
240	450	355	480	400
300	525	400	570	500
400	640	500	—	—
500	760	630	—	—

10.4. Thermische schakelaars

Als een apparaat of leiding moet worden beveiligd tegen overbelasting is het mogelijk om een thermische schakelaar in de stroomketen op te nemen. Een dergelijke schakelaar bevat gewoonlijk een stukje bimetaal, d.w.z. een metalen staafje dat uit twee stroken van verschillend metaal met sterk uiteenlopende uitzettingscoëfficiënt bestaat, die over de gehele lengte op elkaar zijn gelast. Het gevolg van het verschil in uitzettingscoëfficiënt is dat het staafje van vorm verandert als de temperatuur een wijziging ondergaat. Ter illustratie is in fig. 10—11 het principe van een dergelijke schakelaar afgebeeld. Wordt de stroomsterkte te groot dan ver-

vormt het staafje en sluit de stroomkring die de uitschakelspoel bekrachtigt. Het gevolg hiervan is dat de vergrendeling wordt opgeheven en de schakelaar S de stroomketen onderbreekt.

Op dit principe berusten de schakelaars die in de handel worden gebracht. In fig. 10–12 is een voorbeeld van een dergelijke schroefautomaat voor lichtinstallaties afgebeeld. Ze heeft de afmetingen van een normale smeltveiligheid en kan zonder meer in de zekeringhouder worden geschroefd.

Een eenmaal onderbroken stroomketen kan worden hersteld door de drukknop op de automaat weer in te drukken.

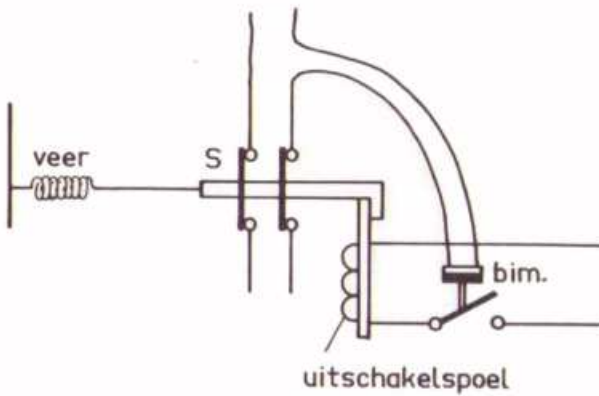


Fig. 10–11

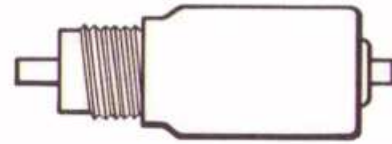


Fig. 10–12

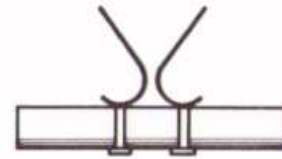


Fig. 10–13

10.5. Maximaalschakelaars

Deze veiligheden reageren direct op de grote stromen en zijn dus niet zo traag als de thermische schakelaars. Het principe is dat van een relais. Vaak zijn maximaalschakelaars gecombineerd met thermische schakelaars.

10.6. Spanningsbeveiliging

Deze veiligheden hebben tot taak om te voorkomen dat de elektrische spanning van één geleider t.o.v. andere geleiders dan wel massa te hoog wordt, waardoor de isolatie kan worden beschadigd (doorslag) en vuurverschijnselen kunnen optreden (vonkvorming). In fig. 10–13 is een hoornveiligheid afgebeeld. Bij deze veiligheden, die veelvuldig worden toegepast, zijn de beide elektroden zodanig t.o.v. elkaar geplaatst dat bij de maximaal toelaatbare spanning een vlamboog (doorslag) optreedt tussen de punten waar de elektroden het dichtst bij elkaar zijn. Door de warmte-ontwikkeling beweegt de vlamboog zich zeer snel naar boven.

Dat betekent dat de afstand tussen de elektroden groter wordt en de boog automatisch dooft. In tegenstelling tot deze „open” veiligheid is de edelgasveiligheid een „gesloten” spanningsveiligheid.

Door de snelle ontwikkelingen in de elektronica zijn de laatste jaren een groot aantal nieuwe componenten op de markt verschenen. Vooral op het gebied van de halfgeleidertechnologie is er een enorme toename van het aantal soorten componenten.

Deze snelle uitbreiding van het onderdelenpakket maakt het noodzakelijk de stof van het boek 'Componenten' in 2 delen onder te brengen. Daarbij is een logische scheiding aangebracht tussen de passieve componenten zoals weerstanden, spoelen, condensatoren, kabels, schakelaars en veiligheden en actieve componenten zoals transistoren, dioden en integrated circuits.

De opzet van deze boeken is evenals de opzet van het boek 'Componenten' gericht op een systematische en functionele behandeling van de belangrijkste elektronica-componenten die in de handel zijn.

De stof is daarbij beperkt tot de onderdelen voor algemeen gebruik.